



Evolutions environnementales des littoraux des atolls coralliens dans les océans Indien et Pacifique : le cas des archipels Maldivien et Tuvaluan

Caroline Rufin-Soler

► To cite this version:

Caroline Rufin-Soler. Evolutions environnementales des littoraux des atolls coralliens dans les océans Indien et Pacifique : le cas des archipels Maldivien et Tuvaluan. Océan, Atmosphère. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2004. Français. NNT : . tel-00409568

HAL Id: tel-00409568

<https://theses.hal.science/tel-00409568>

Submitted on 10 Aug 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Bretagne Occidentale
Laboratoire Géomer
UMR 6554 CNRS
Institut Universitaire Européen de la Mer

Thèse de Doctorat Nouveau Régime

Discipline : Géographie

**ÉVOLUTIONS ENVIRONNEMENTALES DES
LITTORAUX DES ATOLLS CORALLIENS DANS LES
OCÉANS INDIEN ET PACIFIQUE :
LE CAS DES ARCHIPELS MALDIVIEN ET
TUVALUAN**

Volume 1

Présentée le 17 décembre 2004 par

Caroline Rufin-Soler

Devant un jury composé de :

Monsieur Jean-Claude Bodéré, Examineur
Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale
Monsieur Charles Le Cœur, Examineur
Professeur à l'Université de Paris I Panthéon-Sorbonne
Monsieur Yannick Lageat, Directeur de thèse
Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale
Monsieur Alain Miossec, Rapporteur
Professeur à l'Université de Nantes
Monsieur Paolo-Antonio Pirazzoli, Examineur
Directeur de Recherche au CNRS
Monsieur Jean-Noël Salomon, Rapporteur
Professeur à l'Université de Bordeaux III

UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Laboratoire Géomer
LETG UMR 6554 CNRS
Institut Universitaire Européen de la Mer

Thèse de doctorat nouveau régime

Discipline : Géographie

**ÉVOLUTIONS ENVIRONNEMENTALES DES LITTORAUX DES ATOLLS
CORALLIENS DANS LES OCÉANS INDIEN ET PACIFIQUE :
LE CAS DES ARCHIPELS MALDIVIEN ET TUVALUAN**

Volume 1

Présentée le 17 décembre 2004 par

Caroline Rufin-Soler

Devant un jury composé de :

Monsieur Jean-Claude Bodéré, Examineur

Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale

Monsieur Charles Le Cœur, Examineur

Professeur à l'Université de Paris I Panthéon-Sorbonne

Monsieur Yannick Lageat, Directeur de thèse

Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale

Monsieur Alain Miossec, Rapporteur

Professeur à l'Université de Nantes

Monsieur Paolo-Antonio Pirazzoli, Examineur

Directeur de Recherche au CNRS, Laboratoire de Meudon-Bellevue

Monsieur Jean-Noël Salomon, Rapporteur

Professeur à l'Université de Bordeaux III

Avant Propos

A l'aboutissement de cette recherche, je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères au Professeur Yannick Lageat, mon directeur de thèse, pour m'avoir suivie tout au long de ces nombreuses années et pour m'avoir soutenue et encouragée.

Je suis tout particulièrement reconnaissante à Monsieur Paolo-Antonio Pirazzoli, Directeur de Recherche au CNRS, pour m'avoir ouvert si gentiment les portes de son bureau de Meudon, et m'avoir informée en 2000 d'une mission débutant dans l'archipel des Maldives. Sans lui, cette thèse n'aurait pas la même signification.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers le Professeur Jean-Claude Bodéré, alors directeur du Laboratoire Géolittomer-Brest devenu Géomer, pour m'avoir permis d'étudier de lointaines contrées.

Je remercie également les Professeurs Ch. Le Cœur, A. Miossec et J.-N. Salomon, pour avoir accepté d'évaluer ce travail de recherche.

L'étude présentée est l'aboutissement de longues années consacrées à collecter des données, à plonger, à effectuer des levés de terrain sous une chaleur accablante qui m'a valu non seulement d'être considérée comme une véritable occidentale aux yeux de ma famille tuvaluane¹, mais aussi comme une paria aux Maldives.

Pour mon terrain maldivien, mes remerciements doivent tout d'abord aller aux membres de la mission *INQUA-Maldives* et plus particulièrement à son directeur, le Professeur Nils-Axel Möerner, qui a eu l'extrême gentillesse de m'accepter dans ce programme. La découverte scientifique d'un lieu revêt avec lui une signification toute particulière. Ses connaissances et son enthousiasme m'ont été très bénéfiques. Restera en ma mémoire sa phrase empreinte de philosophie au retour de chacune de nos plongées : « je plonge donc je suis » !

Je sais gré à William Allison de son aide précieuse sur mes terrains, du secours de ses nombreuses connaissances sur les Maldives.

Françoise et Jacques Laborel sont des « scientifiques fous » de gentillesse auprès desquels vous apprenez et vous découvrez sans cesse. Nos discussions, leurs relectures, leurs connaissances illimitées dans le domaine récifal m'ont énormément servi dans l'élaboration de ce travail, qu'ils en soient chaleureusement remerciés.

Ma gratitude va à : Jacques Collina-Girard (Monsieur *ès Atlantide*) pour ses nombreuses connaissances sur les encoches sous-marines (et sur plein d'autres choses), Alexandre Dupuch, Sue Dawson, Björn Lembke, Pr. Mickaël Tooley, David Dominey-Howes pour tout ce qu'ils m'ont apporté et enseigné sur terre comme sous l'eau.

J'ai particulièrement apprécié la collaboration des maldiviens : Mohamed Imad, qui m'a permis d'obtenir de nombreuses informations tant officielles qu'officieuses sur l'ensemble des programmes d'aménagement de l'archipel, Monsieur Mohamed Zameer du ministère du Tourisme, Monsieur Mohamed Aslam du ministère des Travaux publics, Messieurs Mohamed Khaleel et Mohamed Ali, pour leur accueil au sein du ministère de l'Environnement, messieurs Hassan Maniku.

Pour son accueil à chacun de mes séjours maldiviens « Shukuriyya » à Naazly.

¹ Occidentale dans le dictionnaire tuvaluane : personne ne pouvant apprécier la quiétude des îles, la sieste au plus chaud de la journée et le jour béni du dimanche.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mes « parents adoptifs » tuvaluan, Sauni, qui nous a malheureusement quittés depuis, et Iona, pour m'avoir si gentiment accueillie au sein de leur famille et m'avoir ouvert les portes de la communauté tuvaluane des îles de Nanuméa et de Nukulaelae. « *Fakafetai* ».

Sont remerciés aussi, Niko Iona et Hilia Vavae, du Service météorologique de Funafuti, pour leur amitié, leur aide, et les données indispensables fournies dans l'interprétation des variations climatiques. Niko m'a particulièrement assisté lors des entretiens que j'ai réalisés auprès de la population tuvaluane.

Fakafetai lasi aux amis tuvaluans (Marica, Jyell, Teu, Molimao, Tiani) et aux autres (Barry, Hilary, Emmanuel, le Père Québécois) pour leur assistance sur le terrain et leur amitié. Ils ont rendu mes séjours extraordinairement riches.

Je tiens également à remercier les membres de la SOPAC (South Pacific Applied Geoscience Commission), et tout particulièrement Franck Martin, Russell Howorth pour m'avoir fourni un bureau lors de ma recherche bibliographique et m'avoir accueilli si gentiment à chacune de mes escales fidjiennes ainsi que P.D. Nunn, Géographe à l'Université de Suva.

Merci :

- à Guillaume Marie membre du « pôle Pacifique » pour son soutien, nos échanges endiablés sur des hypothèses plus extraordinaires les unes que les autres. Je garderai tout particulièrement en mémoire ses fameuses chemises indiennes !

- à Cyril et Marianne, pour leur amitié, leur bonne humeur, leur cuisine et leurs soirées légères et légendaires avec une mention toute spéciale pour Cyril, toujours présent dans les moments difficiles,

- à Iwan et Cécile qui m'ont soutenue, encouragée et aidée directement ou indirectement,

- à Emmanuel et Jacqueline Giraudet, Delphine, Dorothée, et Alain pour leur aide et leur amitié, ainsi que Vincent, Pierre-Arnaud, Antoine, Anna...et tant d'autres pour avoir été là.

Je remercie enfin mes parents pour m'avoir donné l'envie d'ailleurs, m'avoir permis de le découvrir et m'avoir aidée durant les moments difficiles (plus particulièrement ces derniers jours). Merci à ma fratrie et à ma famille élargie pour son soutien et ses encouragements.

Enfin... j'embrasse tendrement Jeanne et Alexandre. Ils sauront à quel point ils ont été importants dans l'aboutissement de ce travail. Qu'ils me pardonnent tous deux ces longues absences.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	2
SOMMAIRE	4
INTRODUCTION GENERALE	5

PREMIÈRE PARTIE – LES ATOLLS DANS LEUR CONTEXTE STRUCTURAL ET OCÉANIQUE

Chapitre 1 – Variations morphologiques des archipels : Formes et associations de formes	18
Chapitre 2 – La genèse des atolls	63
Chapitre 3 - Le rôle des variations eustatiques dans l'évolution des archipels	89

DEUXIÈME PARTIE – LES FACTEURS D' ÉVOLUTION INFLUENCANT LES STRUCTURES ATOLLIENNES

Chapitre 4 – Evolution des accumulations sédimentaires à différentes échelles de temps et d'espaces	145
Chapitre 5 – Les agents contemporains de la dynamique littorale	188
Chapitre 6 – Les comportements environnementaux dans la perspective des changements Globaux	238

TROISIÈME PARTIE – L'HOMME ET LA GESTION DU MILIEU

Chapitre 7 – Les milieux insulaires face aux nouvelles contraintes socio-économiques	251
Chapitre 8 – Les pressions anthropiques exercées sur les milieux insulaires : le cas des artificialisations	298
Chapitre 9 – Vers une gestion plus adaptée des espaces littoraux insulaires	341
Chapitre 10 – Des changements eustatiques à tout prix !	367
CONCLUSION GENERALE	379
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	383
LISTE DES FIGURES	401
LISTE DES TABLEAUX	406
TABLE DES MATIERES	407
ANNEXES – Volume séparé	

Les Maldives et les Tuvalu sont des archipels océaniques récifaux situés respectivement dans les océans Indien et Pacifique (cf. Figure 1). Longtemps ignorés ou considérés comme inaccessibles, ces paradis perdus sont devenus les archipels du « *global warming* » ou du « *global change* ».

Si les Maldives sont connus par les Occidentaux pour leur paysage idyllique et leurs sites de plongée, l'existence des Tuvalu était insoupçonnée il y a encore cinq ans de cela. Seuls les nissologues, les étudiants de géographie ou les exploitants d'internet pouvaient avoir eu connaissance de leur existence. Désormais, qui ne connaît « Tuvalu, l'atoll qui perd pied » ou « Tuvalu menacé par la montée des eaux » ?

Le thème de recherche

L'impulsion de cette recherche nous fut donnée par le professeur Jean-Pierre Pinot qui souhaitait développer plus en avant des travaux sur les formes d'accumulations particulières que sont les récifs coralliens. De par nos travaux antérieurs, menés sur l'atoll de Tetiaroa dans l'archipel de la Société, au cours de notre maîtrise, et sur la réponse géomorphologique des atolls face à une remontée supposée du niveau de la mer lors du DEA, nous souhaitons prolonger l'étude des formes atolliennes. La question du devenir des atolls coralliens, territoires supra-littoraux, et des accumulations sédimentaires qu'ils portent est cruciale dans la perspective de la remontée du niveau de la mer.

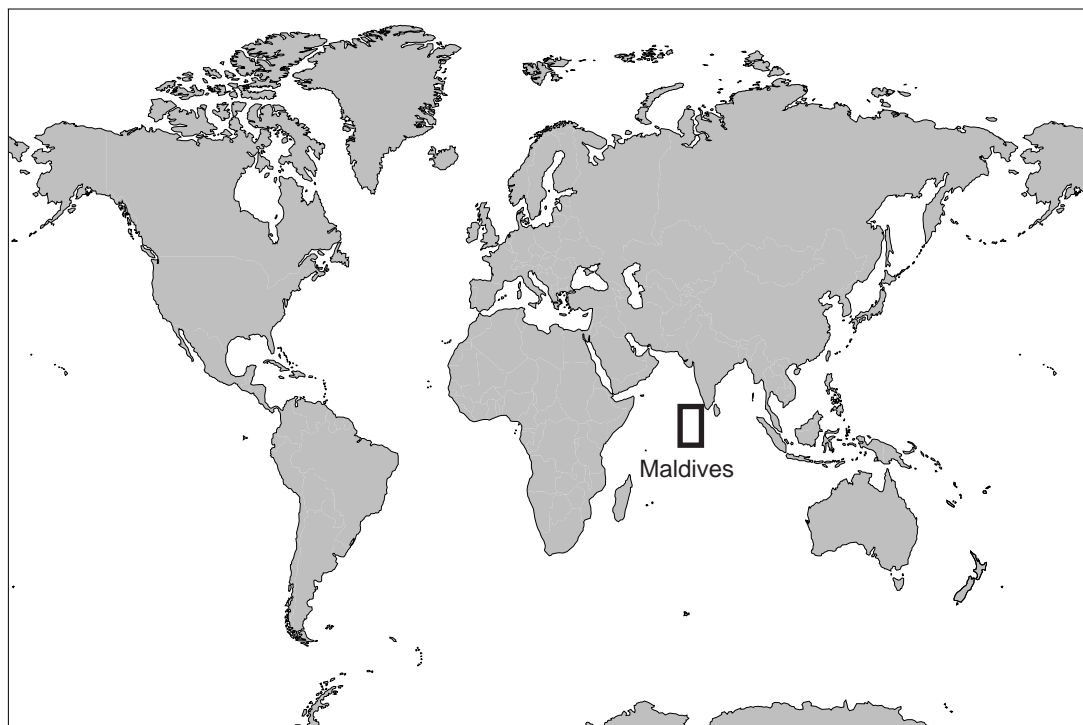
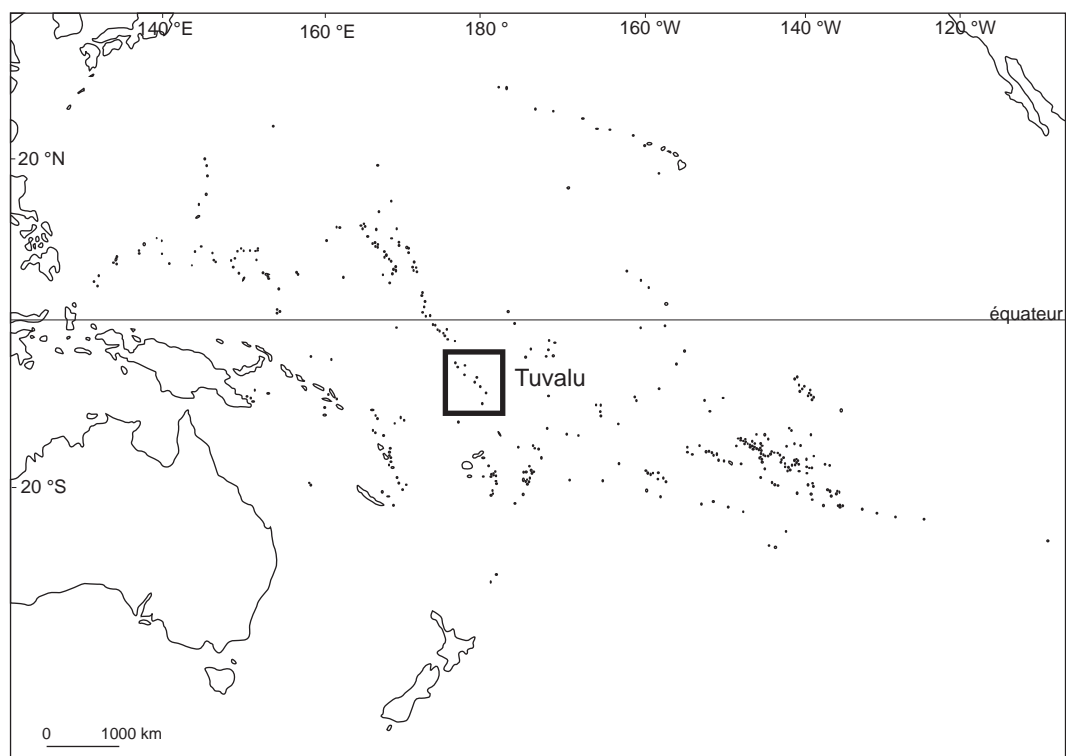
Les objectifs de ce mémoire sont, d'une part, de déterminer les causes naturelles et humaines responsables de la vulnérabilité des territoires atolliens, et, d'autre part, d'estimer leur devenir dans la perspective d'une élévation du niveau de la mer.

La complexité de ces modelés d'accumulation implique une approche naturaliste qui consiste à observer et comprendre les formes, les agents et les processus responsables. Pour cela, une analyse à différentes échelles spatio-temporelles est nécessaire.

Il nous faut également appréhender la dimension prospective en liaison avec l'élévation du niveau de la mer, enjeu humain et économique fondamental pour ces territoires exigus.

Les recherches menées dans les deux archipels l'ont été dans des conditions différentes liées à l'éloignement des sites, aux moyens financiers disponibles et aux efforts humains engagés. Nous avons effectué deux missions de terrain aux Tuvalu à la fin de l'été et au début de l'automne 1999 et

Figure 1 : Localisation des terrains étudiés



2001 et quatre aux Maldives au printemps et à l'automne 2000 et 2001. Le choix de ces dates s'est fait dans un souci de comparaison saisonnière, annuelle ou pluriannuelle des accumulations sédimentaires. Ce temps a été également mis à profit pour effectuer des recherches bibliographiques, rencontrer des interlocuteurs locaux (universités, ministères, sociétés privées...), procéder à des analyses de terrain avec différents outils (théodolite, tachéomètre laser, questionnaire), couplés à une observation naturaliste des territoires.

L'analyse de terrain s'est faite suivant des moyens et une logistique différents, ce qui explique l'importance des résultats obtenus sur les Maldives par rapport à ceux que nous a apportés l'archipel tuvaluan. Cette différence est liée au problème du transport vers les Tuvalu. Lors de notre première mission, en 1999, le théodolite que nous avons apporté a été endommagé au cours du voyage, et le matériel qui nous avait été prêté s'est révélé, après analyse, si déréglé qu'il n'a permis aucune exploitation des données. Au cours de la seconde mission, en 2001, c'est le pied du tachéomètre qui a été endommagé, et le temps consacré à la recherche du matériel de remplacement l'a été malheureusement pris au détriment du travail de terrain. Ainsi, nous n'avons pas pu effectuer des mesures sur l'ensemble de l'île de Fongafale, en vue d'une comparaison avec des levés antérieurs menés par différents auteurs, mais uniquement sur les trois quarts de son territoire.

Alors que nous étions dans notre seconde année de thèse, un programme de recherche (*The Maldives Project*) de la section « *Sea level changes and coastal evolution* » de la commission INQUA (*International Quaternary research*) a débuté sous la direction du professeur N-A. Mörner². Ce programme pluridisciplinaire devait durer trois ans, de 2000 à 2003, et devait permettre une reconstitution fine du comportement eustatique des derniers 20 ka aux Maldives. Pour cela, nous avons effectué diverses investigations, aussi bien terrestres que sous-marines dans des secteurs que nous avons identifiés préalablement à l'aide de cartes marines (atoll de Goidhoo, les atolls de Kaafu, l'atoll d'Addu). Malheureusement, toutes les données collectées n'ont pu être analysées assez rapidement pour être intégrées à ce travail.

Au cours de ces missions, les recherches engagées ont non seulement concerné la morphologie insulaire et sous-marine, et leurs résultats seront exposés ultérieurement, mais également d'autres travaux ont été engagés : des forages lagonaires réalisés dans l'atoll de Goidhoo en vue d'une analyse paléoclimatique³, des échantillonnages pour datations, des prélèvements pour des analyses polliniques⁴...

Notre rôle a consisté à repérer les formes sous-marines paléoeustatiques et observer les morphologies insulaires en vue de la reconstruction de leurs histoires à différentes échelles de temps. Les indicateurs sous-marins que nous avons répertoriés lors de nos différentes plongées sont peut-être les apports les plus originaux pour un géomorphologue. En effet, ils retracent précisément le comportement

² Directeur du Laboratoire de Paléogéophysique et Géodynamique de Stockholm - Suède

³ Laboratoire de Micropaléontologie, MdC Sue Dawson (Ecosse)

⁴ Laboratoire paléoenvironnemental, Pr. Mickael Tooley (Angleterre)

eustatique du niveau relatif de la mer lors de la remontée postglaciaire et permettent d'envisager le comportement à venir de ces formes d'accumulations. Ne disposant pas d'un appareil sous-marin capable de supporter des profondeurs supérieures à 5 m, tous les clichés illustrant ce mémoire ont été réalisés en collaboration avec Messieurs Jacques Laborel, Professeur honoraire, spécialiste de biologie récifale et Jacques Collina-Girard, Maître de Conférences de Géologie à l'Université d'Aix-Marseille. Pour les travaux sur l'évolution des constructions insulaires que nous avons menés dans le cadre de l'INQUA ou uniquement pour nos travaux personnels, les méthodes d'analyse sont plus traditionnelles puisqu'elles ont été effectuées à partir d'observations ou de levés de terrain par un tachéomètre laser.

Le choix des Maldives et des Tuvalu répond à deux critères. Le premier, lié à la distinction morphologique *stricto sensu* des deux archipels, oriente vers l'étude d'un des grands types d'édifices coralliens que sont les atolls, en limitant le champ d'investigation aux océans Indien et Pacifique. Le second s'intéresse à leur caractère insulaire exacerbé, à leur isolement dans une perspective d'élévation du niveau de la mer. Les Maldives ont des caractéristiques géomorphologiques particulières suscitant des questionnements : la taille de l'archipel, s'étirant sur plus de 800 km de long, la forme des atolls, le nombre d'accumulations sédimentaires, le dédoublement de l'alignement insulaire... Le choix des Tuvalu se voulait novateur. Il permettait d'analyser un archipel peu étudié, ayant toutes les caractéristiques d'un micro-Etat insulaire et servait par son analyse de référent vis-à-vis d'autres archipels océaniques du Pacifique.

Ainsi, si ces deux terrains constituent les archipels privilégiés de notre mémoire, de nombreux exemples annexes seront également développés. Le manque de données existantes sur les archipels maldiviens et tuvaluans nous a, en effet, contrainte à rechercher des exemples à l'échelle mondiale. La complexité de certaines morphologies identifiées sur les îles comme sur la bordure océanique des atolls, ou les problèmes liés à la surpopulation, à la gestion des micro-territoires seront abordés au travers d'autres exemples, d'îles basses comme d'îles hautes, qui viendront étayer notre démonstration.

L'archipel des Tuvalu, constitué d'atolls coralliens et d'îles coralliennes, est localisé dans l'océan Pacifique sud-ouest et s'étire entre 5° - 11° de latitude sud et 176° - 180° de longitude est (cf. Figure 2). Avec ses neuf édifices coralliens, ce micro-Etat totalise 26 km² pour une zone économique exclusive de 900 000 km². L'atoll de Funafuti est le plus grand des neuf édifices puisqu'il mesure approximativement 21 km de long (N-S) sur 14 km de large (E-W) et qu'il totalise 270 ha de terres émergées dont 142 concernent l'île de Fongafale (cf. Figure 3), qui est l'île capitale de l'Etat, sur laquelle nous avons effectué notre mémoire.

L'archipel des Maldives s'étire entre les latitudes 7° 06' N et 0° 42' S, le long du méridien 73° E (cf. Figure 4), respectivement de l'atoll d'Ihavandhippolhu à celui d'Addu, bien qu'historiquement l'archipel se borne au nord à l'atoll de Thiladhunmathee signifiant littéralement « la pointe d'en haut ». La partie centrale de l'archipel, comprise entre 5° 30' N et 2° 30' N, consiste en une double chaîne d'atolls ceinturant une mer intérieure, « *the Maldivian inner sea* », dont les profondeurs varient entre 500 m au nord et 300-400 m au sud et dont la largeur est d'environ 50 km. L'archipel est composé de 26 édifices récifaux dont l'un des plus méridionaux, l'atoll d'Huvadhu, est un des plus grands au monde avec environ 2 250 km² (Stoddart D.R., 1971a). D'après les dernières mesures effectuées (Naseer A. et Hatcher B.G., 2004), l'archipel totalise 227,45 km² avec une zone économique exclusive de 90 000 km².

Figure 2 : Présentation simplifiée de l'archipel des Tuvalu

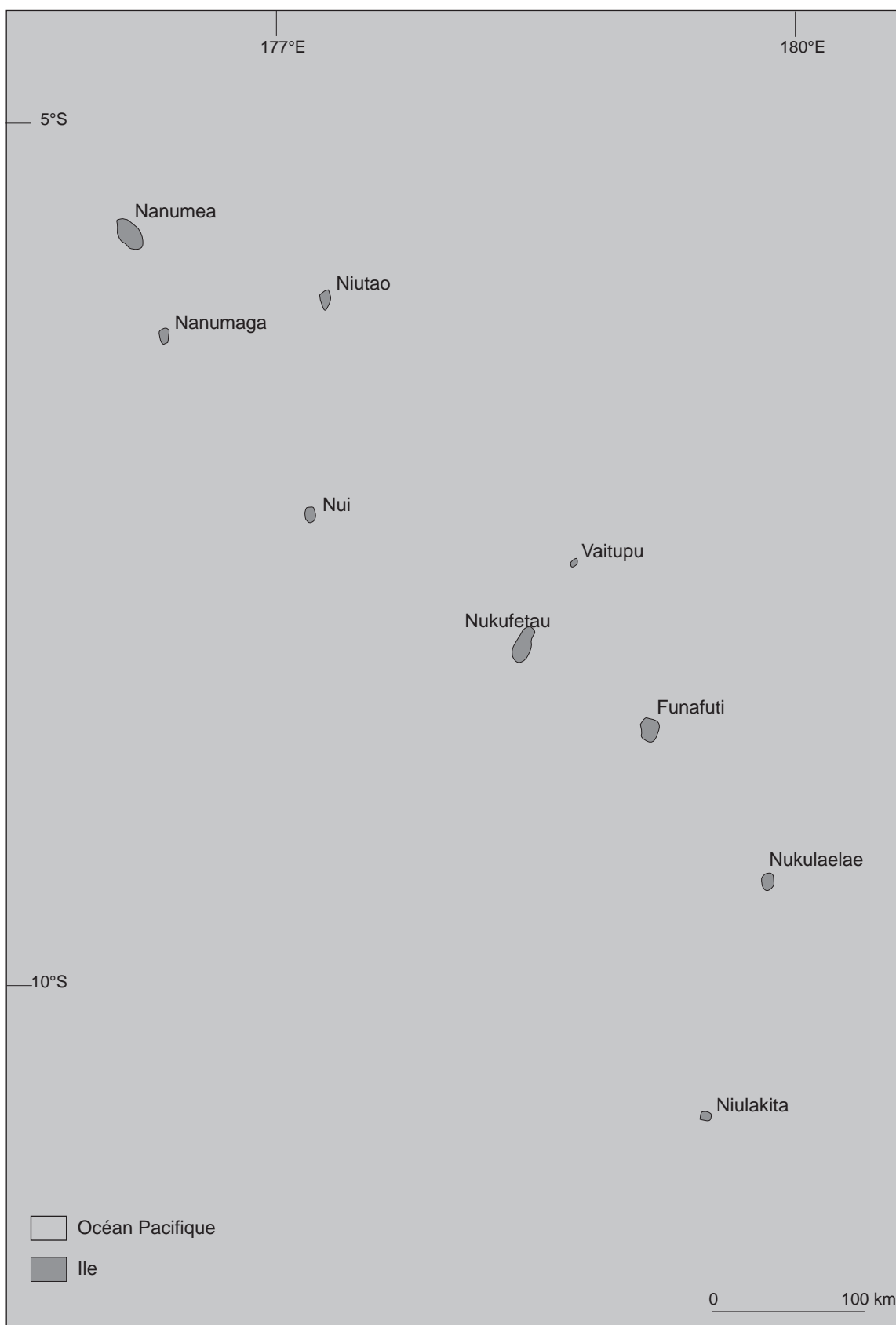


Figure 3 : Présentation de l'atoll de Funafuti

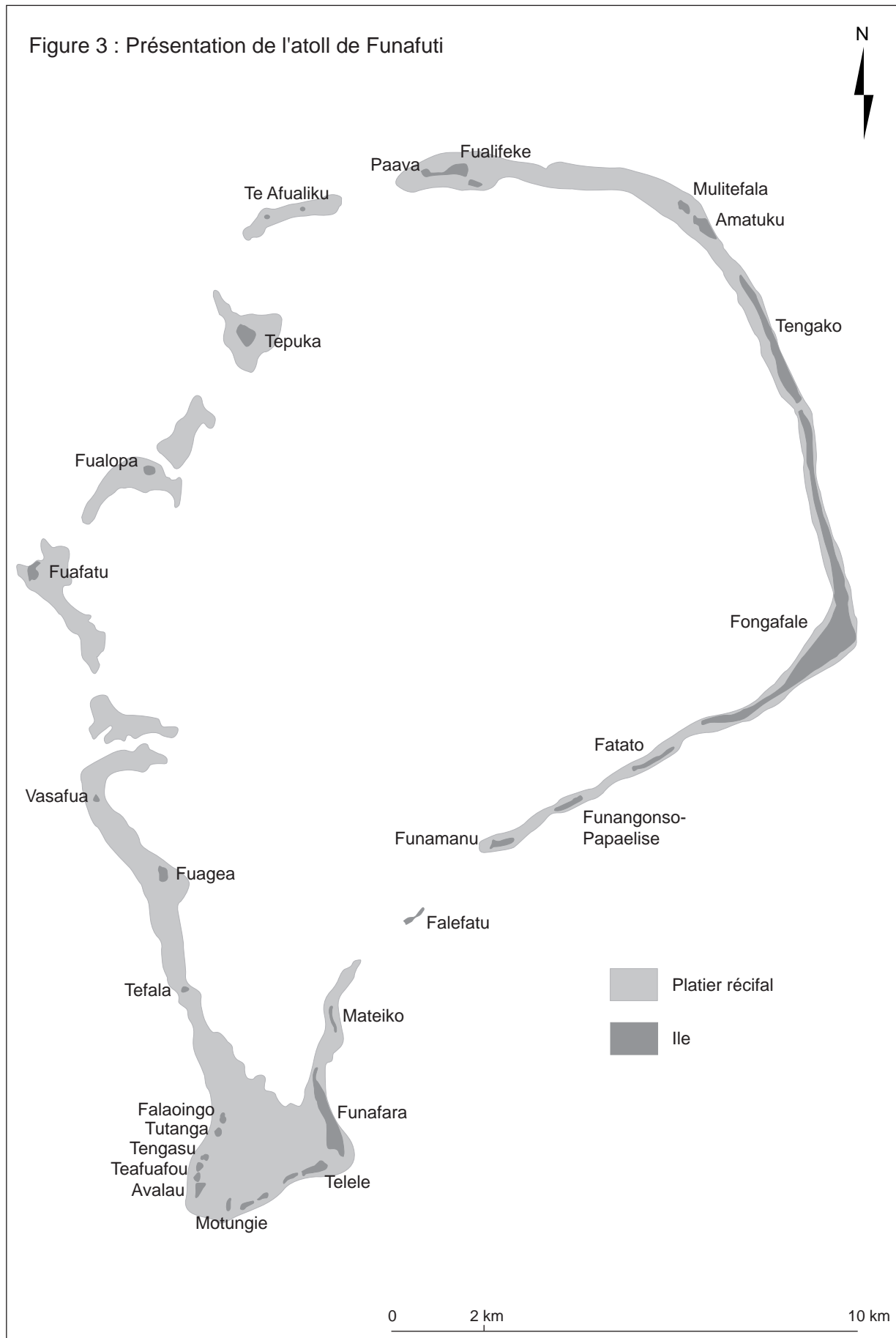
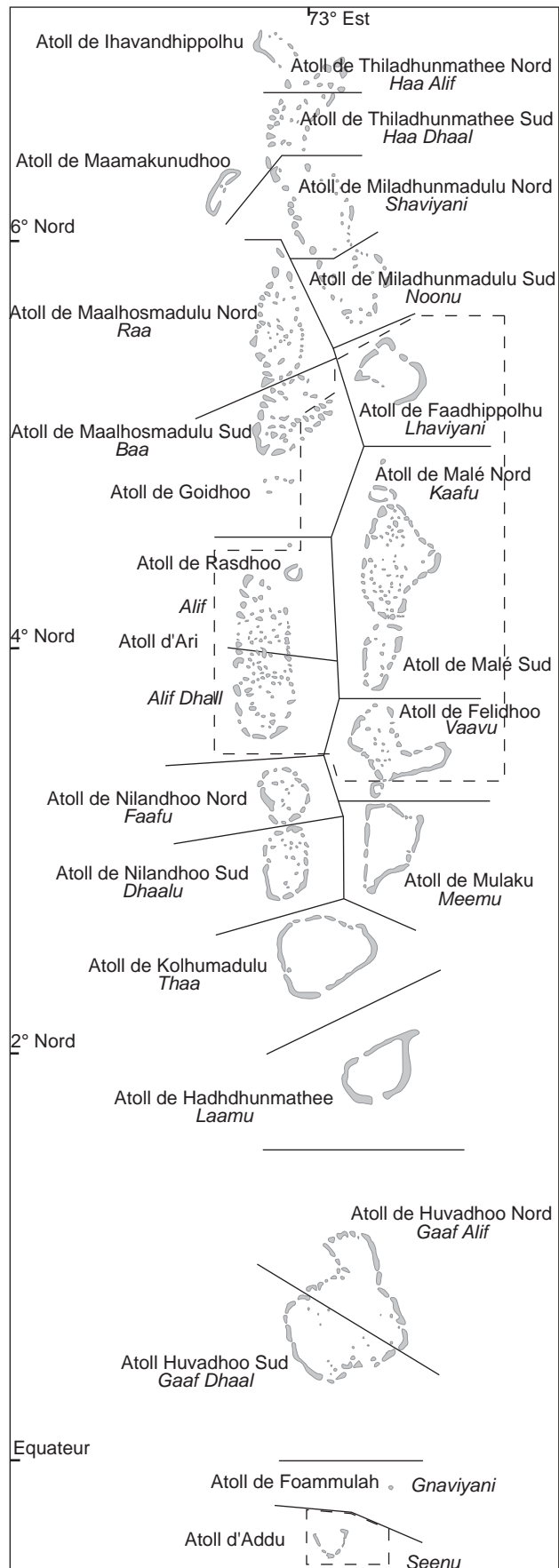
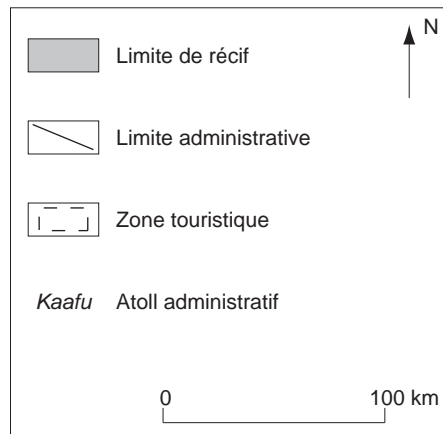


Figure 4 : Présentation de l'archipel des Maldives



Les Maldives sont disposées sur un plateau volcanique situé à 1 000 m de profondeur, entre les Laccadive au nord et les Chagos au sud, et sont directement bordées par des fonds océaniques avoisinant les 2 000 – 2 500 m, avant d'atteindre rapidement des profondeurs de 4 000 m.

Comme nous venons de le voir, il existe 26 structures récifales individualisées qui vont être différentes des divisions administratives. Nous pourrions donc avoir pour un même ensemble morphologique plusieurs noms différents introduisant des distinctions purement étatiques.

Ainsi, respectivement du nord au sud nous trouverons :

- 1 - Thiladhunmathee nord et Ihavandhippolhu : Haa Alif ;
- 2 - Thiladhunmathee sud et Maamakunudhoo : Haa Dhaal ;
- 3 - Miladhunmadulu nord : Shaviyani ;
- 4 - Miladhunmadulu sud : Noonu ;
- 5 - Alifushi et Maalhosmadulu nord : Raa
- 6 - Maalhosmadulu sud, Moresby et Goidhoo : Baa
- 7 - Faadhippolhu : Lhaviyani ;
- 8 - Kaashidhoo, Gaafaru, Malé nord et Malé sud : Kaafu ;
- 9 - Thoddoo, Rasdhoo et Ari nord : Alifu alifu ;
- 10 - Ari sud : Alif Dhaal ;
- 11 - Felidhu et Vattaru falhu : Vaavu ;
- 12 - Mulaku : Meemu ;
- 13 - Nilandhu nord : Faafu ;
- 14 - Nilandhu sud : Dhaalu ;
- 15 - Kolhumadulu : Thaa ;
- 16 - Hadhdhunmathee : Laamu ;
- 17 - Huvadhoo nord : Gaafu Alifu ;
- 18 - Huvadhoo sud : Gaafu Dhaal ;
- 19 - Foammulah : Gnaviyani ;
- 20 - Addu : Seenu.

Afin de faciliter la lecture de cartes et d'écrits, nous avons attribué dans ce mémoire des noms aux atolls morphologiquement indépendants, qui ne possédaient aucun toponyme. Ainsi, l'atoll constitué des atolls administratifs de Thiladhunmathee nord, Thiladhunmathee sud, Miladhunmadulu nord, Miladhunmadulu sud a été baptisé l'atoll septentrional. Celui localisé entre les atolls de Maalhosmadulu nord et Maalhosmadulu sud est désigné comme l'atoll de Moresby.

Nous sommes partie du postulat que les changements globaux étaient un fait avéré se traduisant par des variations positives du niveau de la mer, la recrudescence d'événements tempétueux..., rendant les atolls et leurs îles extrêmement vulnérables. Travailler dans cette perspective implique, d'une part, une recherche sur les niveaux marins antérieurs et le comportement des récifs et des îles durant les phases eustatiques et, d'autre part, sur le comportement de ces différentes morphologies dans des évolutions climatiques holocènes et historiques. Riches d'enseignements, ces travaux nous serviront dans la perspective d'une géographie prospective.

Il s'agissait alors de s'interroger sur les impacts d'une élévation du niveau de la mer, comme :

- la réduction de la taille de l'île,
- les modifications du trait de côte,
- le changement dans la croissance récifale,
- le blanchiment des coraux,
- l'artificialisation et la fixation du trait de côte,
- les modifications des conditions hydrométriques insulaires,
- la salinisation des sols,
- la baisse dans la production alimentaire,
- l'augmentation de la température de l'air et la recrudescence des cyclones et des submersions,
- un besoin d'une puissance énergétique plus importante avec la multiplication de l'air conditionné,
- l'augmentation des maladies (choléra, dysenterie, typhoïde..) et du risque de malnutrition,
- les mouvements de population vers l'île-capitale,
- les mouvements de population vers des îles hautes internationales.

Ces questionnements nous ont permis d'articuler notre mémoire en trois parties.

La première partie s'attache à présenter les caractéristiques atolliennes des archipels dans un contexte structural et océanique. Il s'agit plus qu'une simple présentation puisqu'elle vise à mettre en évidence, à toutes les échelles de temps et d'espace, les formes observées. Dans un premier chapitre, nous nous attacherons à définir les types d'édifices récifaux rencontrés à l'échelle des archipels avant d'en rechercher l'origine au sein du deuxième chapitre. Au cours du troisième chapitre, nous ferons varier l'échelle d'analyse afin d'appréhender les variations eustatiques du Quaternaire à partir d'héritages présents sur les littoraux et des enseignements issus de régions voisines pour proposer des éléments de réflexions concernant l'évolution des archipels, et plus particulièrement celui des Maldives, depuis la remontée postglaciaire.

Nous nous intéresserons dans la deuxième partie à l'évolution actuelle des accumulations sédimentaires. Pour cela, nous chercherons à comprendre la construction et l'évolution de ces formes suivant différents paramètres et à partir de plusieurs outils. Ainsi, dans le chapitre 5, nous analyserons,

à partir d'un emboîtement d'échelles, les changements climatiques pouvant influencer ou fragiliser ces formations. Le chapitre six est, quant à lui, un chapitre prévisionnel dans la perspective de la remontée du niveau de la mer qui vise à déterminer, de façon qualitative, le devenir des territoires atolliens.

Un fois le bilan des variations naturelles effectué, l'objectif de la troisième partie est de caractériser le risque anthropique pour ces territoires insulaires fragiles, en raison de la concentration des populations, de la culture insulaire, des extractions... En effet, le risque n'est considéré que lorsque les sociétés littorales sont menacées.

Enfin, nous tenterons à partir d'une revue de presse, de reconsidérer l'évolution de ces archipels dans la perspective du « *global change* ».

Nous dresserons un bilan de l'évolution et du comportement des constructions récifales et des accumulations sédimentaires depuis la remontée postglaciaire jusqu'à nos jours. Nous nous interrogerons sur les craintes à avoir pour l'avenir de ces micro-Etats insulaires et de la légitimité de telles inquiétudes ?

Il apparaît incontestable que les températures à la surface de la Terre augmentent, que les glaciers montagnards reculent, que les inlandsis menacent de fondre, que le niveau de la mer augmente et que les tempêtes se multiplient mais s'agit-il de modifications globales ou locales ? A-t-on un recul suffisant pour analyser ces faits ? S'agit-il de modifications sur le long terme ou de variations ponctuelles ? L'effet de serre est-il une cause des changements climatiques actuels ou un problème éminemment politique ?

PREMIERE PARTIE

LES ATOLLS DANS LEUR CONTEXTE STRUCTURAL ET OCEANIQUE

Cette première partie présente le cadre structural et océanique des deux terrains d'étude. Ces archipels atolliens situés dans deux océans différents présentent une grande variété de formes et de structures. Dans ces contextes géographiques, il s'agit de présenter les formes récifales majeures à l'échelle des archipels puis des atolls, avant de nous intéresser à l'architecture générale de cette structure morphologique particulière qu'est l'atoll par l'examen de ses différents compartiments. Cette approche principalement descriptive est essentielle pour appréhender le travail qui suit.

Dans le second chapitre, nous tenterons de mettre en relation avec les principales unités topographiques la structure géologique régionale. Il s'agit donc de préciser le champ structural à partir duquel les archipels se sont créés, en faisant ressortir le caractère d'autant plus complexe de leur développement que leur origine est plus incertaine.

L'histoire de la mise en place des paysages se réfèrera à différentes échelles de temps, processus essentiel pour comprendre la disposition et l'origine des formes actuelles.

Travailler dans la perspective de l'élévation du niveau de la mer pour un milieu littoral très dynamique soulève des interrogations sur l'évolution passée du trait de côte et sur les connaissances des séquences eustatiques antérieures que nous aborderons en troisième partie.

Chapitre 1 – Variations morphologiques des récifs coralliens : formes et associations de formes

Les atolls constituent des formations coralliennes de « haute mer, émergées à marée haute, sans roche volcanique affleurante, le plus souvent de formes annulaires avec un lagon central » (Battistini R. *et al.*, 1975) : on les qualifie d'atolls océaniques. En effet, ils ne subissent aucune influence des continents et sont soumis aux seules conditions océaniques environnantes (houle, vent...).

Pour certains, le mot atoll aurait une origine maldivien puisqu'il serait issu du Dhivehi⁵ *atholu*. Pour d'autres, il relèverait du malais *atollon*.

Selon les auteurs, il existe différentes appellations pour décrire cette structure. Kuenen (1933 *in* Bourrouilh – Le Jan F.G., 1990), O. Aubert (1994) et A.V. (Belopolsky A.V., 2000) utilisent le terme de plates-formes pour qualifier les atolls de dimensions pluri-kilométriques comme les Maldives et les Tuamotus... Pour d'autres (Agassiz, Forbes), un atoll qui n'a pas une origine liée au phénomène de subsidence est qualifié de pseudo-atoll ou de micro-atoll (Mergner), bien que ce qualificatif nous semble peu adapté du fait qu'il s'agit d'une forme individualisée de l'ensemble épirécifal.

Suivant leur localisation géographique et l'influence de paramètres extérieurs, leurs formes peuvent varier d'un océan à un autre. Ainsi, l'archipel des Tuvalu est composé de formes atolliennes typiques nées d'une évolution volcano-eustatique, alors que, dans le cas des Maldives, les formes sont complexes avec des morphologies emboîtées, sur lesquelles nous reviendrons ultérieurement.

Ces deux formations font partie de la classification établie par A. Guilcher (1953) qui considère trois types d'atolls à travers le monde. Les premiers, comme les formations atolliennes de l'archipel tuvaluan, consistent en des formes dites océaniques avec des lagons ayant des profondeurs de plusieurs dizaines de mètres. La seconde catégorie regroupe les récifs annulaires ayant un lagon peu profond comme les récifs à cayes, bien développés en mer Rouge ou dans le nord-ouest de Madagascar. Enfin, la troisième catégorie caractérise des « chaînes d'anneaux dont les lagons ont des profondeurs variables, généralement inférieures à 30 m, et dont l'ensemble constitue un grand atoll avec un lagon profond au centre ». Il s'agit, pour l'auteur, de farus qui sont les morphologies emblématiques des Maldives. Pour R. Battistini *et al.* (1975), un faru est « un ensemble de récifs annulaires disposés en chaîne pouvant constituer des ensembles annulaires d'ordre supérieur ».

Le nombre d'atolls à travers le monde peut être extrêmement fluctuant suivant la définition que les auteurs utilisent. Ainsi, pour E.G. Purdy et E.L. Winterer (2001), on peut en recenser 525, alors que,

⁵ Langue des Maldives

pour D.R. Stoddart (1965), B. Salvat (1998) et E.H. Bryan (*in* Huetz de Lempis, 1984), on identifie respectivement 425, 420 et 400 structures atolliennes à la surface des océans.

1.1. Originalités des formes atolliennes : vers une exception maldivienne ?

Les formations récifales actuelles sont des formes abouties, héritées d'une morphologie initiale établie à partir des volcans qui les ont fait naître.

Comme l'ont déjà noté bon nombre d'auteurs (Stoddart D.R., 1973 ; Woodroffe C.D., 1992 ; Ali M., 2000), il existe au sein de l'archipel maldivien des différences morphologiques latitudinales majeures entre le nord et le sud de l'archipel (Woodroffe C.D., 1989), liées à l'origine géologique de l'alignement et à son évolution morphologique (cf. Figure 5). Ainsi, on peut observer que plus les formations sont morcelées, plus elles sont âgées, comme dans le nord de l'archipel ; plus elles sont continues, plus elles sont récentes, comme dans le sud. Les îles sont disposées ponctuellement dans le nord alors que dans le sud, on observe de grandes îles sur la façade orientale des atolls et une multitude de petites îles sur la façade occidentale.

Ceci n'est pas exclusif aux Maldives. Les Laccadives⁶, composées de douze atolls, de trois récifs isolés et de cinq bancs submergés, sont un archipel extrêmement morcelé, tandis que les Chagos, comprenant cinq atolls et dix récifs isolés, se rapprochent de la physionomie des atolls méridionaux de l'archipel des Maldives.

1.1.1. Inventaire des structures récifales

La particularité des Maldives réside dans l'abondance des structures atolliennes. Plusieurs niveaux dans la répartition des atolls nous imposent une typologie multi-critères par emboîtements (cf. Figure 6).

Disposés le long du 73° de longitude Est, nous identifions les atolls de premier ordre qui correspondent aux méga-structures individualisées par des chenaux très profonds compris entre 200 et 2 000 m (Admiralty Survey, 1992a, c, b, d) (cf. Figure 7), alors qu'en leur sein, nous observons des profondeurs oscillant entre 30 et 90 m. Il s'agit des atolls de : Ihavandhippolhu, Atoll Septentrional, Maamakunudhoo, Maalhosmadulu nord, Maalhosmadulu sud, Faadhippolhu, Goidhoo, Gaafaru, Malé nord, Malé sud, Rasdhoo, Ari, Felidhu, Vattaru, Mulaku, Nilandhu nord, Nilandhu sud, Kolhumadulu, Hadhdhunmathee, Huvadhoo, Addu. Ces atolls peuvent avoir leur bordure constituée soit de récifs continus (Mulaku, Kolhumadulu, Hadhdhunmathee, Huvadhoo, Addu), soit d'une multitude de petits atolls externes bien individualisés (Ihavandhippolhu, Atoll Septentrional, Maalhosmadulu nord, Maalhosmadulu sud, Malé nord, Malé sud, Ari, Felidhu, Nilandhu nord) ou coalescents

⁶ *Laksha dwipa : hundred thousand isles*

Figure 5 : Caractéristiques environnementales de l'archipel des Maldives

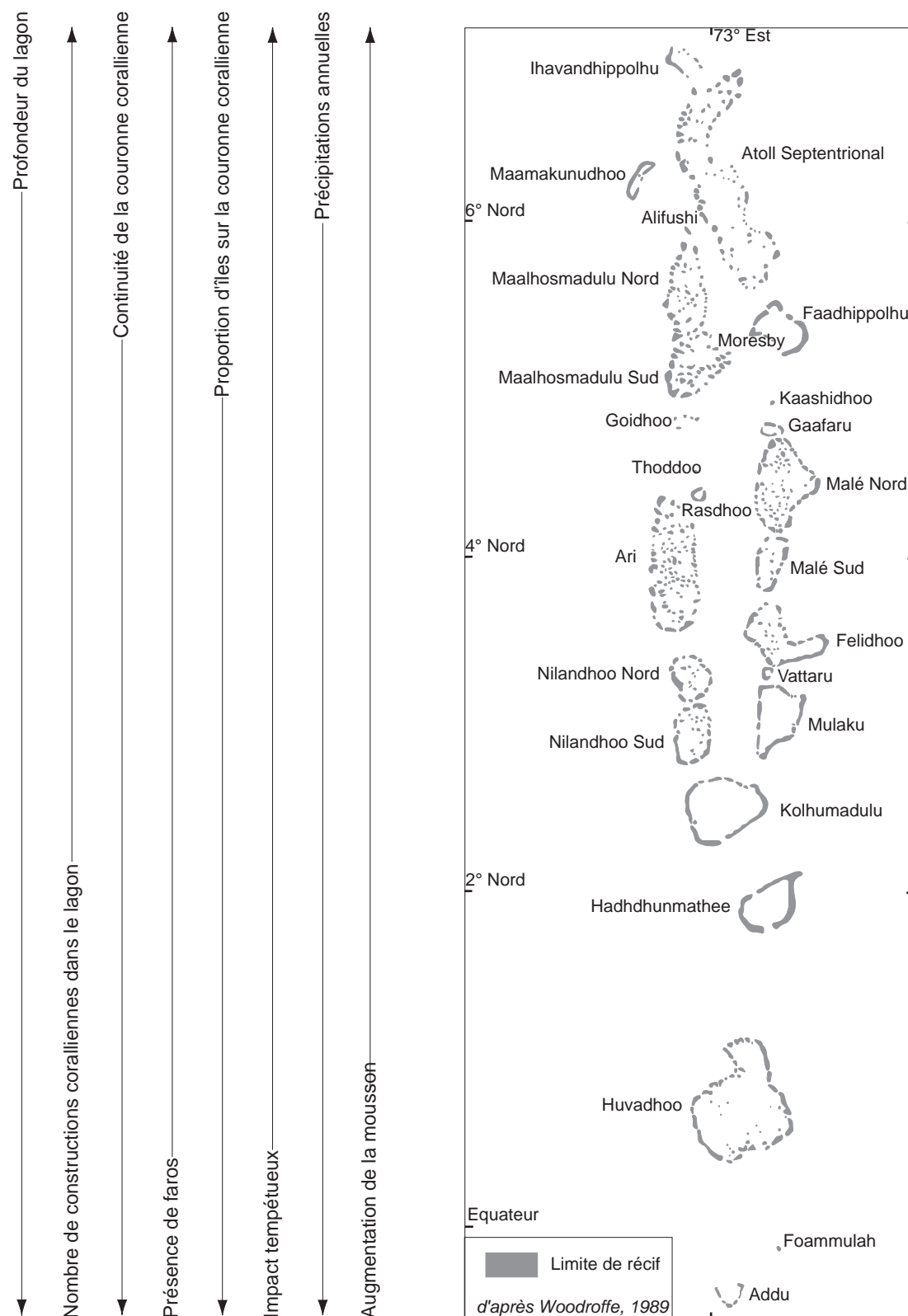


Figure 6 : Divisions des structures dans les ensembles atolliens par types morphologiques

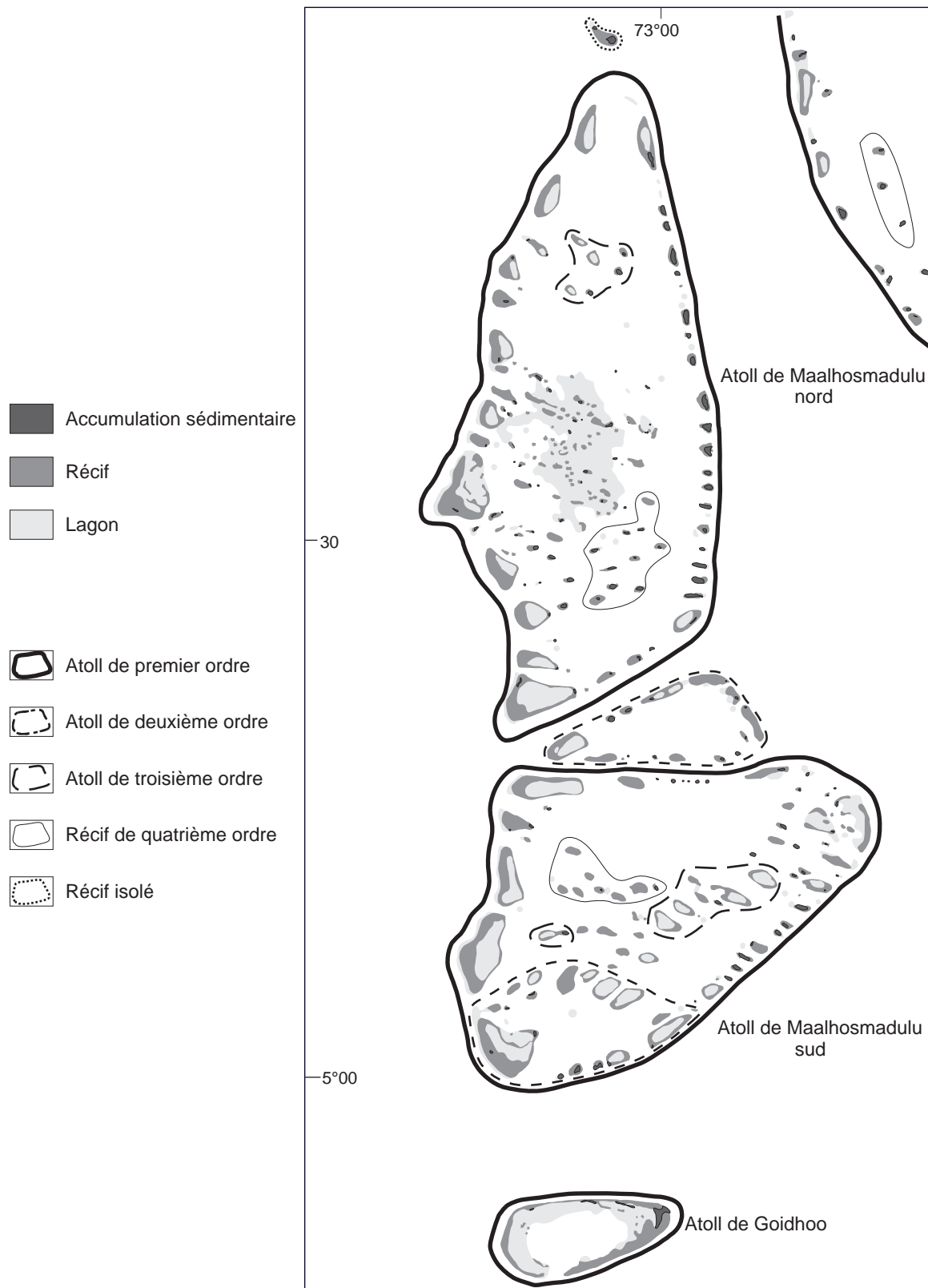
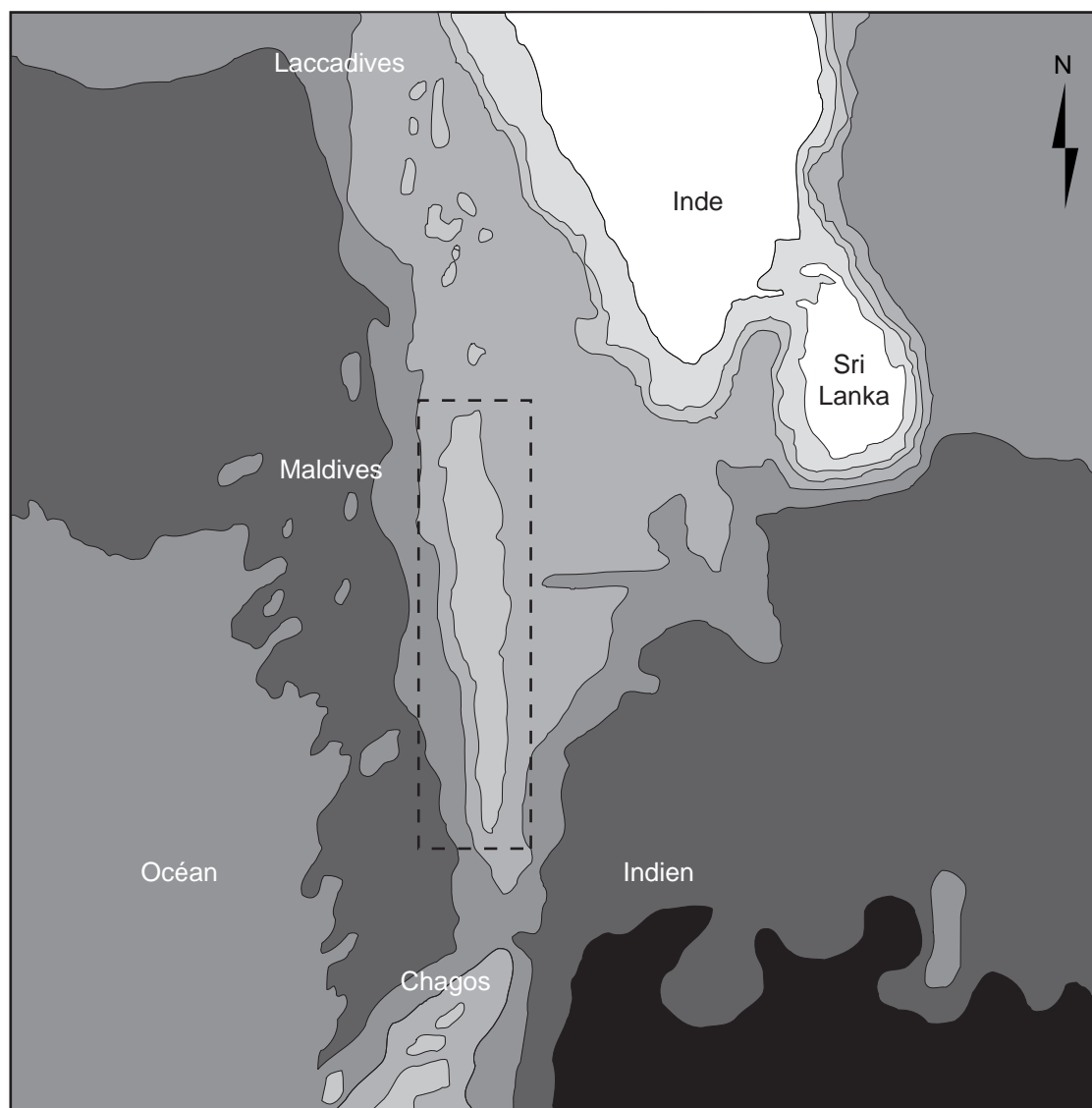
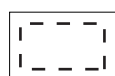


Figure 7 : Bathymétrie simplifiée de la partie Nord Ouest de l'océan Indien

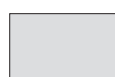


Limite des terres émergées



Limite de l'archipel maldivien

Profondeur en mètres :



200



3000



1000



4000



2000



5000

(Faadhippolhu, Nilandhu sud, Mulaku). Au sein de ce premier ordre, nous avons établi une distinction dans la taille des structures atolliennes entre les méga-atolls (Ihavandhippolhu, Atoll Septentrional, Maalhosmadulu nord, Maalhosmadulu sud, Faadhippolhu, Malé nord, Malé sud, Ari, Felidhu, Mulaku, Nilandhu nord, Nilandhu sud, Kolhumadulu, Hadhdhunmathee, Huvadhoo, Addu) et les autres (Maamakunudhoo, Goidhoo, Gaafaru, Rasdhoo, Vattaru) que nous qualifions de pseudo méga-atolls.

Les atolls de deuxième ordre sont des atolls séparés par des passes inférieures à 200 m et/ou ayant une dépendance importante vis-à-vis d'un méga-atoll. Il s'agit de l'atoll de Moresby, ainsi que des structures situées au sein de l'atoll de Maalhosmadulu sud qui paraissent se différencier de la structure mère. Faut-il rechercher en cela une origine structurale et/ou environnementale ? O. Aubert et A.W. Droxler (1992 ; 1996) suggèrent que ces morphologies particulières sont issues de l'alignement volcanique initial qui a donné naissance aux méga-atolls, situés entre Maalhosmadulu nord et Ari, sans pour autant apporter une démonstration claire.

Les structures de troisième ordre sont des atolls lagunaires, situés à l'intérieur des méga-atolls, comme ceux de l'Atoll septentrional, Maalhosmadulu nord, Maalhosmadulu sud, Malé nord, Malé sud, Ari, Felidhu, Nilandhu nord, alors que les assemblages de quatrième ordre correspondent à des récifs lagunaires isolés, localisés dans toutes les structures exposées précédemment.

Une distinction particulière a été faite pour les îles d'Alifushi, de Kaashidhoo, de Thoddoo, et de Foammulah. Bien qu'il s'agisse de structures récifales localisées le long du 73° de longitude Est, qu'elles soient indépendantes des méga-atolls et isolées par des chenaux supérieurs à 200 m, elles sont exclues de la typologie générale, car il ne s'agit pas d'atolls *stricto sensu*, d'après la définition de R. Battistini *et al.*, (1975).

Cette remarque est également applicable pour l'archipel tuvaluan que l'on assimile injustement à un archipel atollien (cf. Figure 8). En effet, sur les neuf structures que compte l'archipel, celles de Niutao, Nanumanga et Nuilakita sont dépourvues d'un lagon central et ont un ensemble épircéfial peu développé (cf. Figure 9). Elles possèdent au sein de leurs structures un lac d'eau saumâtre que certains qualifient de salé (McLean R.F. et Hosking P.L., 1991) en connexion avec l'océan par un système de galeries. L'édifice récifal de Vaitupu est dans une phase transitoire puisqu'il possède deux micro-lagons internes et des collecteurs de platiers, mais n'a pas encore toutes les caractéristiques d'un atoll (cf. Figure 10). Ainsi, seuls les édifices de Nanuméa, Nui, Nukufetau, Funafuti et Nukulaelae sont des atolls *stricto sensu*. Cette distinction n'est pas liée à l'évolution des édifices puisque, du nord-ouest au sud-est, la distribution des atolls ou des plates-formes récifales est bien respectée, mais peut-être à l'influence de la taille du volcanisme initial. En effet, les plates-formes récifales sont toutes des formations de tailles réduites tandis que les atolls sont des formations bien développées.

Figure 8 : Typologie des îles dans l'archipel des Tuvalu



Figure 9 : Présentation des huit autres systèmes récifaux de l'archipel des Tuvalu

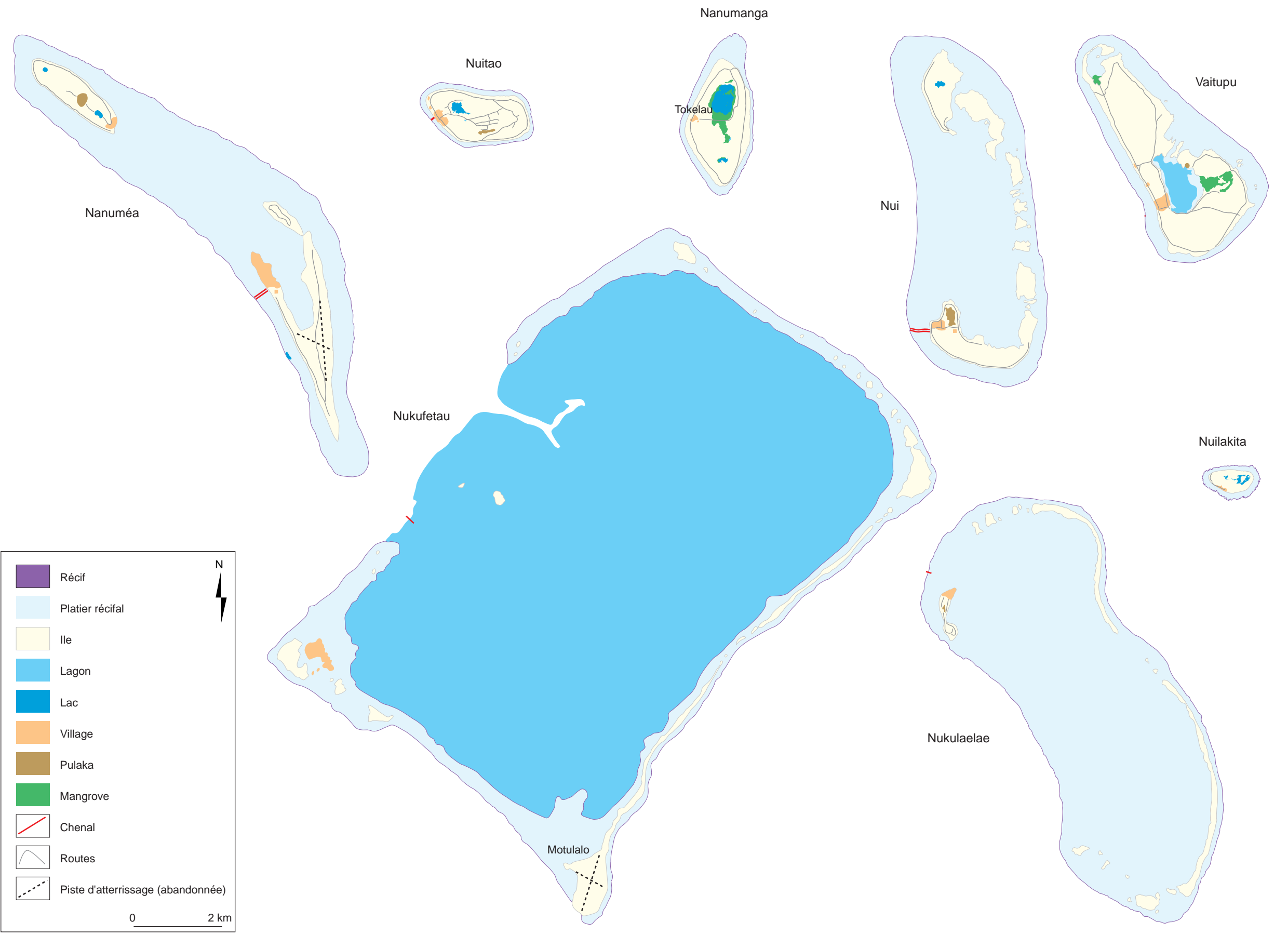


Figure 10 : Interprétation morphologique de l'île de Vaitupu, archipel des Tuvalu



Tableau 1 : Caractéristiques morphologiques des structures récifales dans l'archipel Tuvaluan

Nom des édifices récifaux	Taille de l'ensemble récifal (en km ²)	Type de récif
Nanuméa	20,4	Atoll
Nanumanga	4,2	Récif isolé
Nuitao	3,1	Récif isolé
Nui	19,4	Atoll
Vaitupu	10,2	Atoll et récif isolé
Nukufetau	116,5	Atoll
Funafuti	242,2	Atoll
Nukulaelae	37,8	Atoll
Nuilakita	0,7	Récif isolé

Les structures récifales sont extrêmement dissemblables entre nos deux archipels. Seuls les méga-atolls de Kolhumadulu, Hadhdhunmathee et Huvadho, localisés dans le sud de l'archipel des Maldives, ont des morphologies proches de celles de l'océan Pacifique comme aux Tuvalu, aux Kiribati, aux Marshall.

A une autre échelle, on trouve au sein des méga-atolls ou des pseudo méga-atolls des structures récifales particulières identifiées par un nom maldivien propre.

Les *giri* traduisent des petites constructions coralliennes lagonaires affleurantes possédant des pentes douces qui les rattachent à la structure récifale majeure.

Les *thilas* correspondent à des récifs dont la surface relativement plane est située entre 3-5 et 15 m sous la surface de l'eau. Ces plates-formes circulaires ont des pentes relativement abruptes et correspondent à des plateaux immergés. On les trouve généralement au débouché d'une passe, dans l'atoll principal, ce qui limite leur extension depuis le fond océanique.

Le terme de *Faru* ou *faro* désigne, quant à lui, des récifs sub-affleurants, dépourvus de passes et possédant un lagon sédimentaire central peu profond. Ils sont de tailles variées, mais il est admis qu'ils dépassent 1 km de diamètre. Suivant la profondeur de leur lagon, qui est de toute façon moindre que celle du lagon principal, les *farus* portent un nom différent. Si la profondeur est inférieure à 4 m, on parle de *faru*, alors que, si elle excède 4 m, on parle de *vilu* ou *velu*. Toutefois, cette dernière distinction linguistique n'est pas utilisée en terminologie récifale puisque, malgré les estimations faites, qui établissent une profondeur moyenne du lagon entre 11 et 13 m, on utilise le terme générique de *faru*. Suivant leur localisation dans l'atoll, ils auront une forme différente. Aux abords d'une passe, ils seront allongés du fait de l'importance des courants tandis qu'au sein d'un atoll, ils adopteront une forme plus circulaire.

Les farus ont été pendant longtemps considérés comme endémiques à l'archipel, dont leur nom est originaire. Ces formes particulières ont, en fait, été observées dans d'autres récifs coralliens

comme dans le grand récif sud de la Nouvelle-Calédonie, dans l'archipel des Lau aux Fidji, aux Moluques, ainsi que dans le sud-est de la Nouvelle-Guinée (Guilcher A., 1954).

D'après A. Guilcher (1954), ce sont de petits atolls à lagons assez peu profonds, disposés en chaîne, et dont l'ensemble forme un grand atoll ou une barrière. Cette définition omet curieusement tous les farus lagonnaires qui ont pourtant la même morphologie que leurs homologues situés sur la couronne.

Il existe également le *falhu*, qu'il ne faut pas confondre avec le *faru*. En effet, c'est une formation récifale d'ordre supérieur, correspondant à un atoll de premier ordre. Il s'agit, d'après la traduction dhivehi, d'un lagon principal entouré d'un récif pouvant contenir plusieurs îles.

La singularité de ces structures nous a permis de déterminer des grands types de constructions récifales au sein de l'archipel maldivien, suivant leurs formes et leurs composantes morphologiques. Nous avons pu identifier (cf. Figure 11) :

- les récifs périphériques ;
- les récifs périphériques avec accumulations sédimentaires (avec ou sans végétation) ;
- les récifs lagonnaires ;
- les récifs lagonnaires avec accumulations sédimentaires (avec ou sans végétation) ;
- les farus périphériques (cf. Figure 12) ;
- les farus périphériques avec accumulations sédimentaires
- les farus lagonnaires ;
- les farus lagonnaires avec accumulations sédimentaires (avec ou sans végétation) ;
- les récifs isolés.

Au delà de l'influence des données structurales ou eustatiques, il apparaît évident que des agents extérieurs ont également modelé les formes atolliennes. S'il est admis que certains platiers des archipels de l'océan Pacifique peuvent être dissemblables entre les côtes au vent et les côtes sous le vent, induisant des récifs dissymétriques, dans le cas de l'archipel des Maldives, de nombreux atolls apparaissent comme symétriques à cause du renversement des vents (Stoddart D.R., 1973). Ces observations ont été menées sur les récifs constituant la base de l'édification des atolls emboîtés de la typologie citée ci-dessus. La forme et l'orientation des méga-atolls, des pseudo méga-atolls... étant liées principalement à la direction d'étirement nord-sud de la ride volcanique, nous ne les considérerons pas dans cette analyse. Pour effectuer ces observations, nous nous sommes aidée des photographies aériennes de 1969 (Ministry of Planning and Environment, 1992) réalisées par la Royale Air Force entre le 18 décembre 1968 et le 4 mars 1969 suivant deux échelles de prises de vues, le 25 000^{ème} et le 80 000^{ème}. En utilisant notre méthode de quantification morphométrique basée sur la direction du plus grand axe du platier puis de l'île (cf. Chapitre 4), nous avons évalué la relation entre

Figure 11 : Typologie de récifs

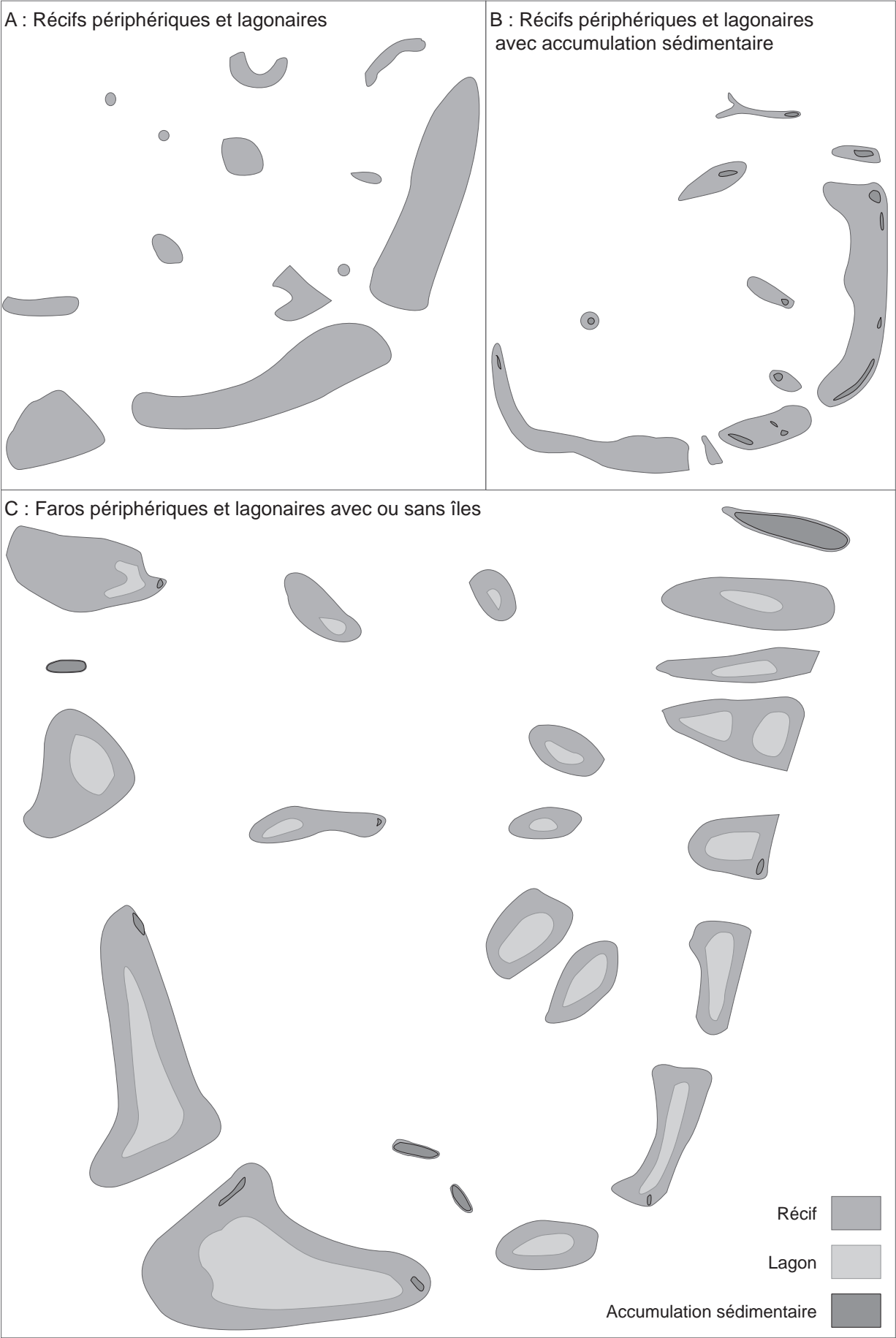
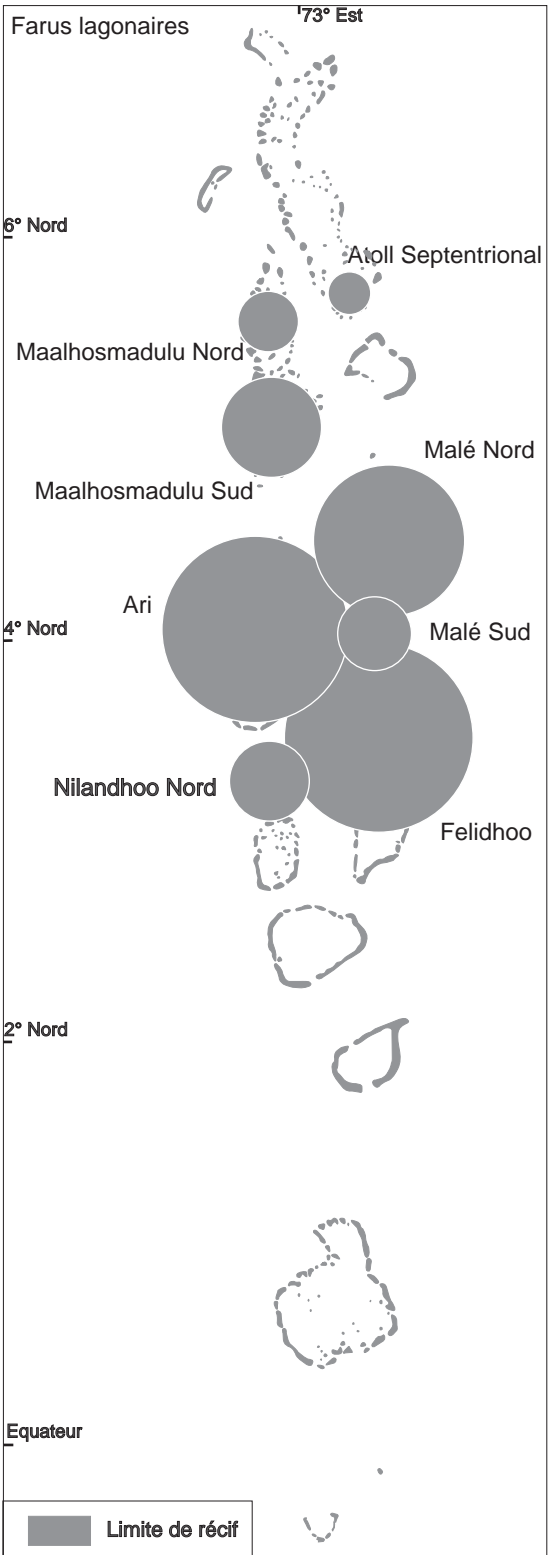
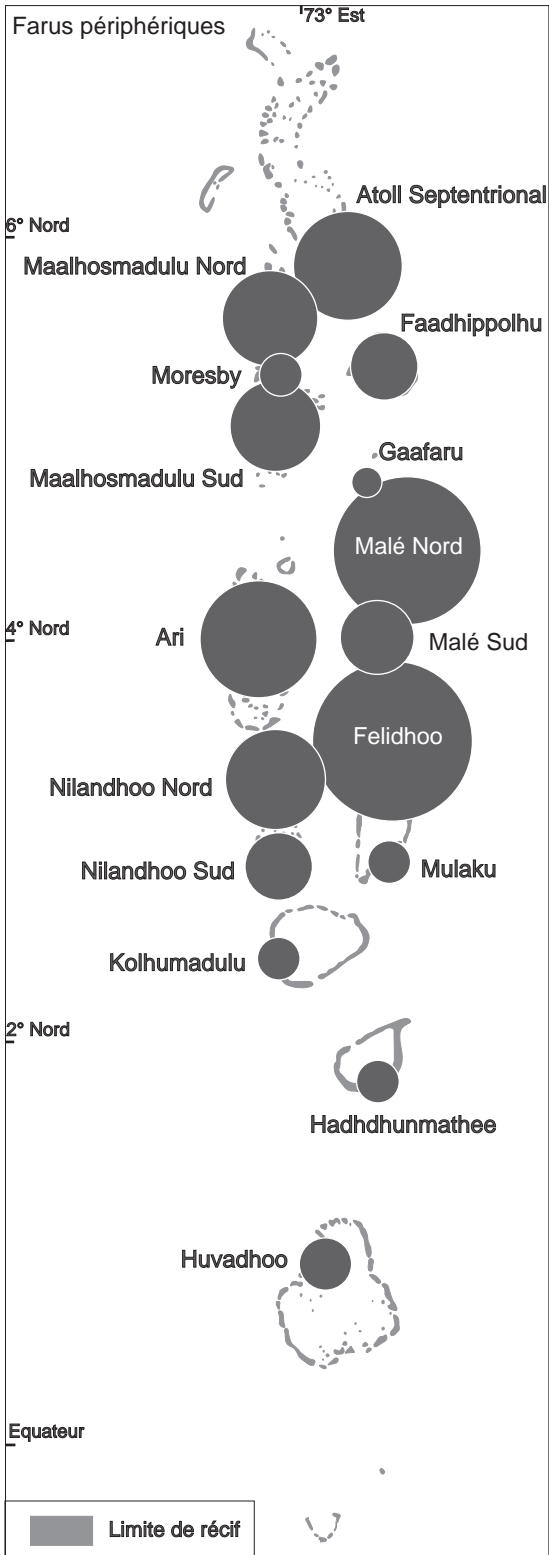


Figure 12 : Localisation et recensement du nombre de farus dans l'archipel des Maldives



l'orientation majeure des récifs émergés ou sub-émergeants et des îles (cf. Chapitre 4) avec celle des vents dominants.

Y-a-t-il comme pour toute forme d'accumulation une adaptation récifale face à la houle dominante ? Au cours de notre traitement, nous nous sommes aperçue que des travaux complémentaires, par traitement d'images satellitaires, avaient été entrepris par A. Naseer et B.G. Hatcher (2001 ; 2004) pour l'ensemble de l'archipel. Leur méthode leur a permis de mettre en évidence que les récifs qui font face aux houles océaniques sont plus larges et ont une pente plus étagée en direction du fond que les récifs situés en position d'abri, soit à l'intérieur des lagons, soit dans la zone centrale de l'archipel, qui sont plus étroits et ont une pente externe plus abrupte. Ils considèrent que les récifs ont une forme qui correspond aux caractéristiques des vents dominants. Pour ces auteurs, les récifs ont gardé une morphologie semblable à celle que l'on pouvait observer lors de la transgression postglaciaire à savoir est-nord-est et ouest-sud-ouest : *« as these atolls grew above the volcanic mountain range that forms the backbone of the maldivian archipelago, the monsoons acted to continually mold the size and shape of the reefs »*.

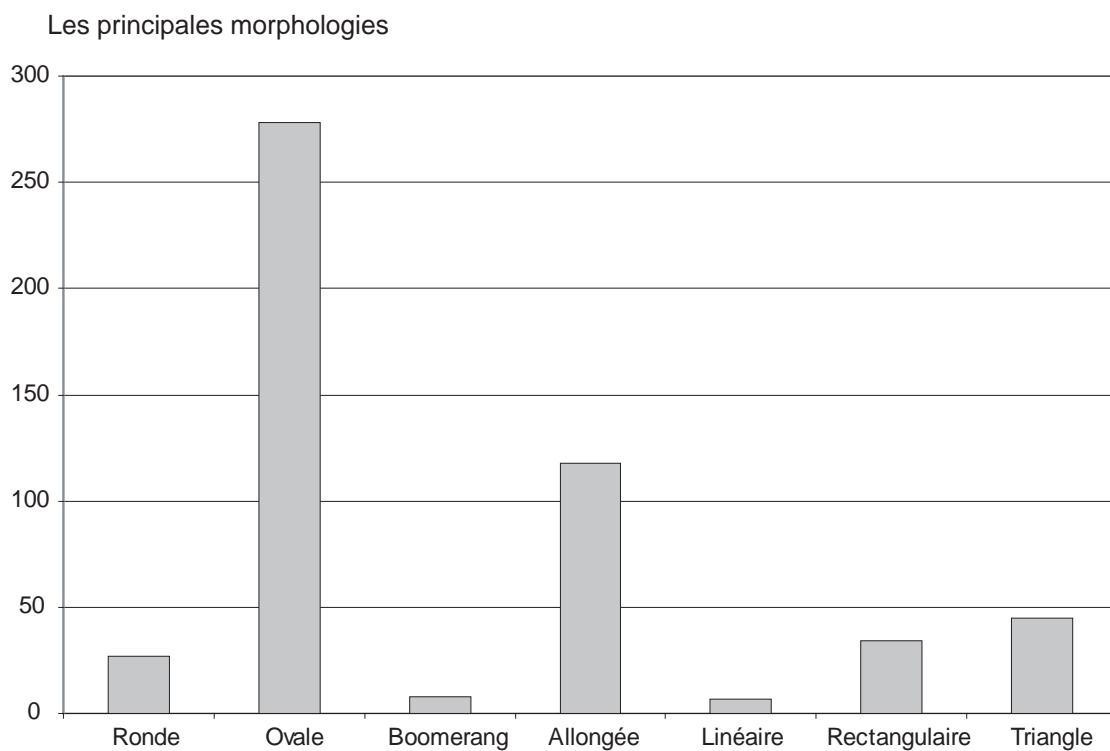
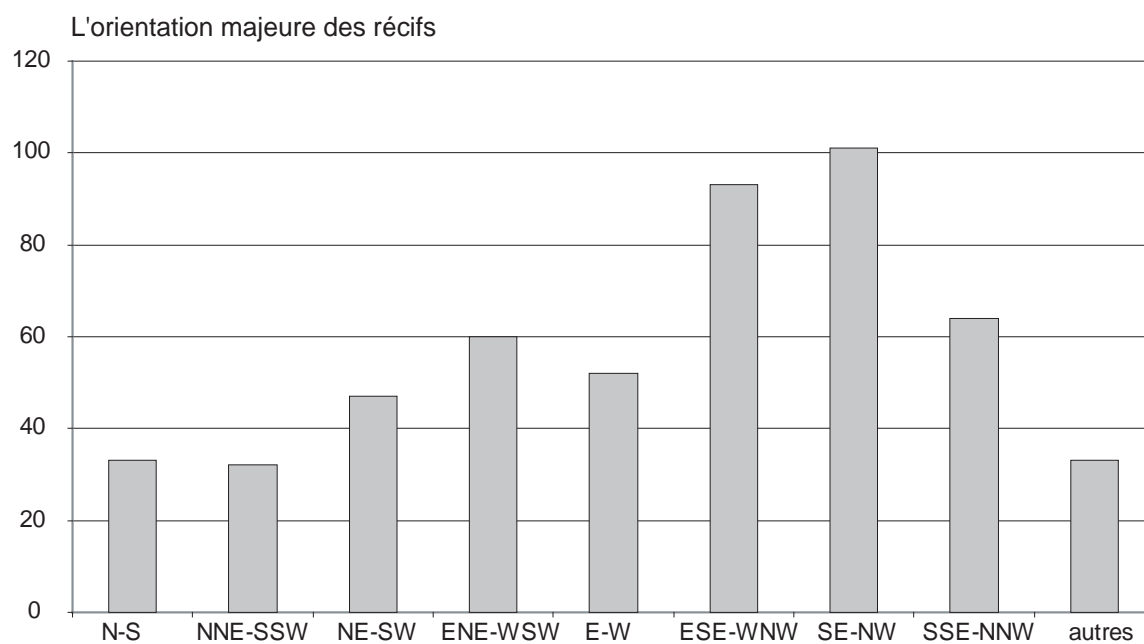
Les résultats de nos travaux sont sensiblement différents car ils ne mettent pas en évidence la même direction dans l'orientation des récifs. En effet, les observations que nous avons réalisées sur 532 récifs ont dégagé deux tendances principales, largement majoritaires, à savoir les directions sud-est - nord-ouest et est-sud-est - ouest-nord-ouest (cf. Figure 13). Cette analyse tendrait à prouver que, soit les récifs actuels, qui ont une histoire géologique récente, ont été façonnés par des vents et/ou des courants sensiblement différents de ceux identifiés par les auteurs, soit l'interprétation climatique des vents dominants au travers de l'analyse morphométrique n'a pas donné les mêmes résultats.

Nous émettons toutefois quelques réserves quant à l'interprétation de nos données car elles ne sont pas exhaustives. Nous n'avons malheureusement pas pu analyser l'ensemble des photographies aériennes dont certaines sont indisponibles.

Au-delà de leur orientation principale, les récifs possèdent des formes particulières qui peuvent également nous renseigner sur les agents structurants externes (cf. Figure 13). D'après F. Pyrard de Laval (1998), « les atollons sont quasi tous ronds, ou en ovale, ayant chacun 30 lieues⁷ de tour ». Lorsque l'on observe la physionomie des récifs à l'échelle de l'archipel, leurs formes se révèlent être plus variées. Comme le montre le graphique, les récifs analysés ont révélé sept formes principales : ronde, ovale, en « boomerang », allongée, linéaire, rectangulaire et triangulaire, dont deux sont les plus répandues, les formes ovoïde et allongée. Elles ont une organisation latitudinale dominante puisque les formes allongées sont surtout situées dans le sud de l'archipel, alors que les formes ovoïdes correspondent aux récifs des parties centrales et septentrionales ainsi qu'aux formes internes des méga-atolls. Les récifs individuels ont également une forte dépendance vis-à-vis de la structure

⁷ Il n'y a pas de précision. Il peut s'agir de la lieue commune (env. 4,5 km) ou de la lieue marine (env. 5,556 km).

Figure 13 : La physionomie des structures récifales dans l'archipel des Maldives



géologique. La présence de récifs allongés sur la façade orientale des méga-atolls de l'archipel nord et centre montre toutefois le rôle des agents hydrodynamiques. Ce constat apparaît également pour la forme en boomerang qui va subir les contraintes des houles dominantes ou la forme triangulaire qui peut indiquer un changement de direction dans les houles entre la remontée postglaciaire, date de leur édification, et aujourd'hui.

Quelle que soit l'échelle d'observation à laquelle on se situe, les atolls sont tous séparés les uns des autres par une multitude de *kandu*, de passes, qui ne semblent pas avoir la même origine.

Certains chercheurs (Chevalier *et al.*, 1968 in Guilcher A., 1979) considèrent les passes comme le résultat de cassures dans le récif par la compaction du matériel récifal, combiné à un élargissement par le déferlement des vagues.

Pour A. Guilcher (1979), on peut attribuer leur morphologie initiale à une origine fluviale durant les phases de régression du niveau marin. Les passes traduisent alors les systèmes d'anciennes vallées submergées. Elles ont été connectées à des vallées fossiles sous-marines qui ont été ensuite recouvertes par des sédiments holocènes. Dans certains cas, la sédimentation a été tellement abondante que certaines vallées ont été entièrement enfouies, ce qui explique ainsi que certains atolls possèdent de nombreuses passes alors que d'autres en sont totalement dépourvus. Si des passes créées antérieurement aux phases régressives du niveau de la mer sont encore présentes aujourd'hui, c'est qu'elles devaient être situées, durant ces périodes, en position d'abri par rapport à la sédimentation de la côte au vent (Guilcher A., 1979). Cette observation indiquerait donc que les conditions extérieures qui influent sur les édifices coralliens ont évolué au cours des époques géologiques.

Kuenen (1933 in Guilcher A., 1954 ; Hopley D., 1982) remarque, quant à lui, que les passes dans les barrières et les couronnes d'atolls ont très rarement une profondeur supérieure à 100 m et voit en cela l'effet combiné des dissolutions subaérienne et marine. Au Tertiaire, les barrières et les couronnes auraient été continues car la subsidence qui était en général assez lente était compensée par la construction. Durant la dernière transgression, qui a été rapide, certains coraux n'ont pu compenser cette remontée et se sont retrouvés distancés puis submergés. Ces arrêts dans la croissance de la couronne corallienne marquent la position actuelle des passes.

Pourquoi ne pas envisager une morphologie née durant les phases d'évolution subaérienne du complexe volcanique ? En effet, lorsque l'on observe les différents stades d'évolution du modèle darwinien, des récifs frangeants aux presque-atolls dans l'archipel de la Société, les passes se localisent soit face au débouché des rivières importantes, soit en léger décalage si ces dernières ont subi des contraintes extérieures. En effet, les rivières transportent avec elles des éléments terrigènes qui augmentent la turbidité des eaux, empêchant ainsi le développement corallien.

L'absence totale ou partielle de passe sur un récif corallien peut être due à la taille de l'île volcanique initiale. En effet, les petites structures volcaniques, peu développées, subissent une subsidence accélérée du fait de l'influence des méga-structures voisines, limitant ainsi leur développement subaérien, comme cela a été le cas pour l'atoll de Tetiaroa dans l'archipel de la Société

(Rufin C., 1997) et comme cela pourrait être le cas pour les atolls de Maamakunudhoo, Goidhoo, Rasdhoo, Gaafaru, Vattaru et les récifs isolés d'Alifushi, de Kaashidhoo, de Thoddoo et de Foammulah dans l'archipel des Maldives et de Naitao, Nanumanga et Nuilakita dans l'archipel des Tuvalu. L'absence totale de lagon pour ces types récifaux, ou leur étendue très limitée, nous laissent toutefois dans l'expectative.

Une fois créées, les passes vont être retouchées lors des cycles glaciaires et interglaciaires comme cela semble être le cas dans l'archipel des Maldives où leur profondeur semble indiquer un contrôle érosif durant les bas niveaux glaciaires.

Si l'on considère que les passes peuvent être des morphologies liées à des variations eustatiques, il est primordial d'observer leur distribution dans les archipels. Ainsi, Darwin constatait que leur nombre était plus important sur les façades récifales de la mer interne des Maldives plutôt que sur les façades océaniques mais y apparaissaient comme plus larges. Les travaux sur la distribution des passes ont été nombreux (Darwin C., 1962 ; Woodroffe C.D., 1992). Il est assez facile d'imaginer que, durant les bas niveaux marins, les eaux météoriques s'écoulaient par les passes afin d'évacuer les eaux séjournant à l'intérieur des méga-structures et empruntaient les plus fortes pentes vers la mer intérieure. Ainsi, si ces eaux n'ont pas été créées les passes, elles les ont toutefois retouchées.

Par contre, pourquoi lorsque le niveau de la mer est remonté, la croissance corallienne ne s'est-elle pas faite dans les passes ? On peut envisager que ces dernières étaient sujettes à de trop forts courants de vidange ne permettant pas aux coraux de se développer, ou alors que la vidange de la sédimentation lagonaire vers la mer interne ou vers les fonds océaniques était si importante que les coraux n'ont pu se développer.

1.1.2. Formes structurales et/ou environnementales : le cas particulier des lagons d'atolls

La particularité des lagons d'atolls et la diversité des formations intra-lagunaires, plus particulièrement dans l'archipel des Maldives, sont sources d'interrogations. Des corrélations ont été faites entre la profondeur des lagons et le volume des précipitations annuelles ou encore entre la profondeur des lagons et la superficie des atolls (cf. Figure 14). Plusieurs auteurs (Stoddart D.R., 1973 ; Purdy E.G., 1974 ; Purdy E.G. et Bertram G.T., 1992 ; Purdy E.G. et Winterer E.L., 2001) estiment que ces composantes morphologiques sont liées mais n'en n'expliquent pas l'origine.

Nous avons observé ces corrélations dans l'archipel des Maldives, sans pouvoir dégager une explication raisonnée. S'agit-il dans le cas de la figure 15, d'une caractéristique morphologique résultant d'une phase d'émersion de l'archipel ? Doit-on voir en cela la théorie de la saucière karstique qui considère que le surcreusement d'un édifice calcaire est d'autant plus important que l'émersion sera longue et que l'édifice récifal sera soumis aux actions climatiques ? Les Maldives pourraient-elles être un « archipelkarst » ennoyé ? (Pham Khang, 1991 *in* Salomon J.-N., 2000). Notre réponse est

Figure 14 : Corrélation entre les précipitations annuelles et la profondeur des lagon d'atolls dans l'archipel des Maldives

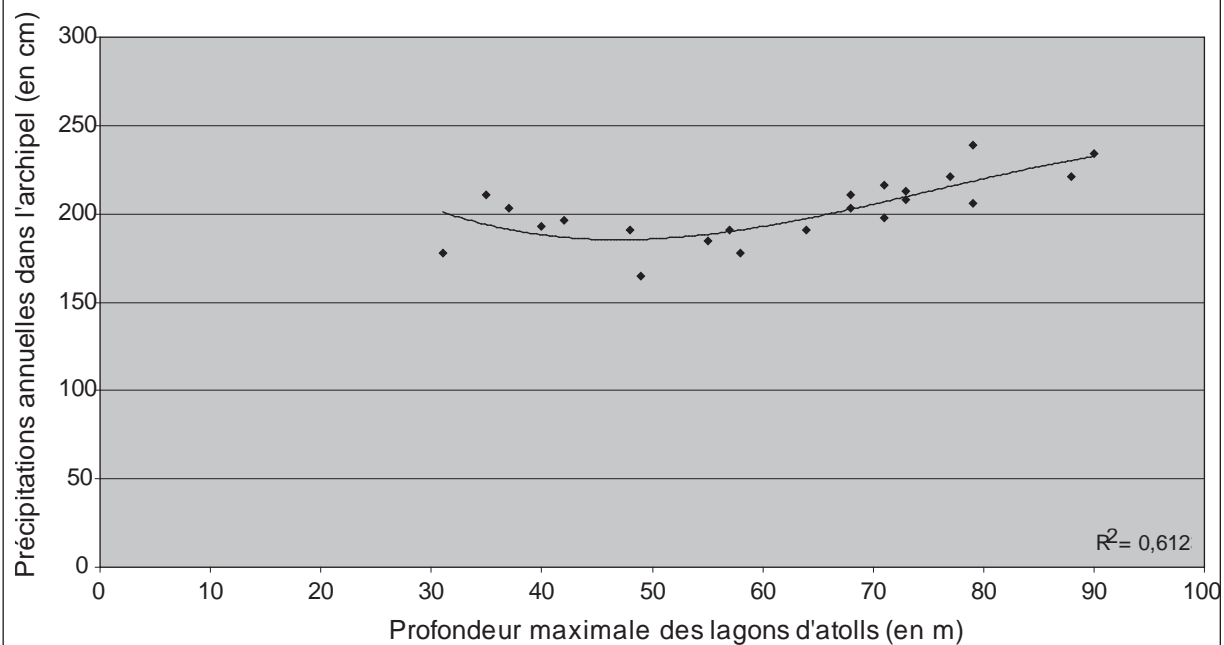


Figure 00 : Corrélation entre la profondeur des lagon d'atolls et leur superficie

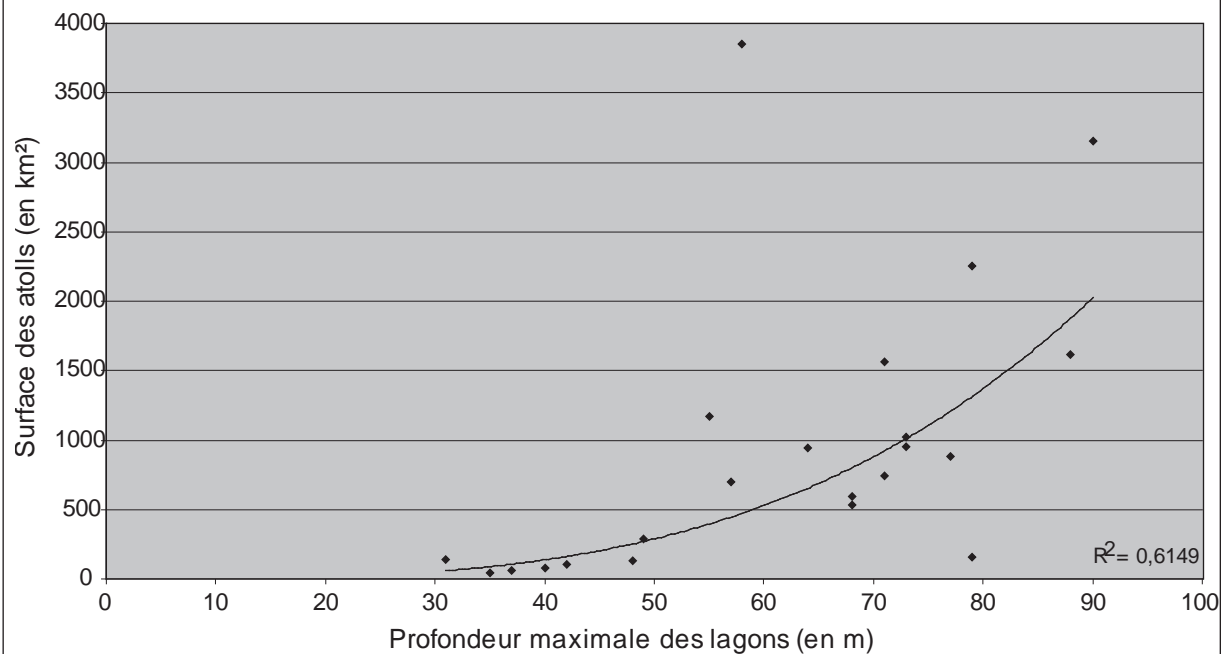
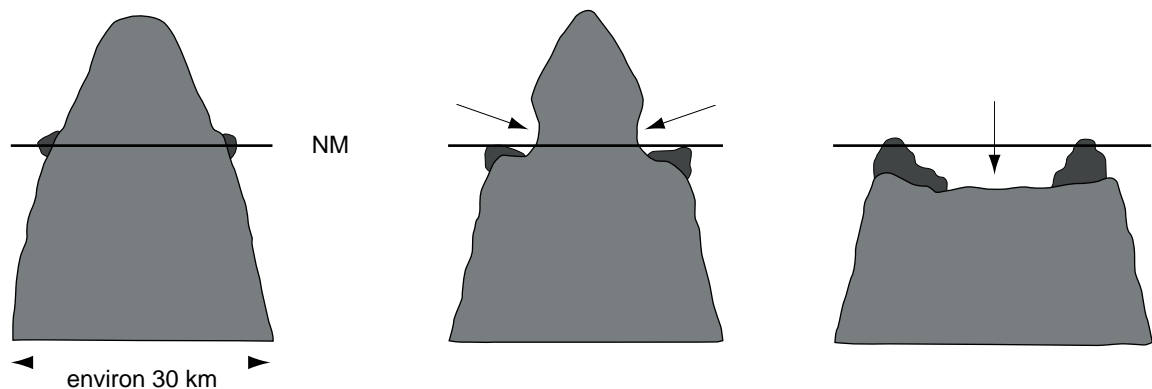
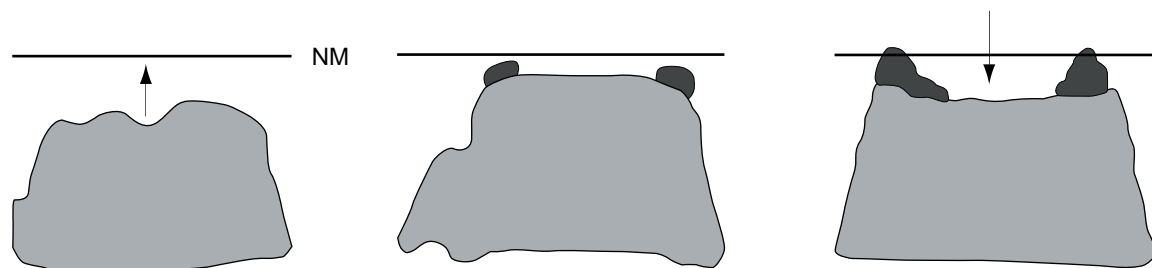


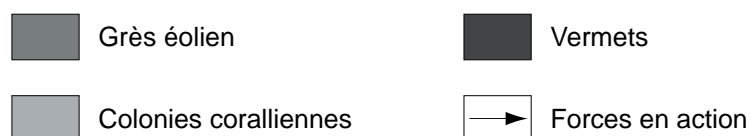
Figure 15 : Convergences morphologiques entre les formes de bioconstruction et les formes de biodestruction (d'après J. Laborel, 2000).



Mise en évidence de la morphologie en "saucière" par l'érosion des parties émergées du grès éolien. Il s'agit d'une érosion classique observée aux Bermudes.



La "saucière" se crée par la croissance de colonies coralliennes submergées. Il s'agit d'un modèle également observé aux Bermudes par Ginsburg et Schoeder (1973).



incertaine car si ce modèle ressemble à certaines structures atolliennes, ayant une bordure récifale saillante et un lagon dégagé par dissolution, la karstogénèse ne peut pas tout expliquer. La figure 15 en est une preuve. Ne devrions-nous pas envisager à travers ce modèle une sédimentation intense des édifices, où les lagons d'atolls deviendraient les réceptacles d'une sur-sédimentation née d'une évolution structurale et eustatique sur le long terme ? Ils seront d'autant moins profonds qu'ils seront petits, ce qui conduit à terme à leur comblement.

Une autre observation a été faite sur ce même archipel concernant la profondeur du lagon et la position par rapport à l'équateur. Ainsi, plus l'atoll est proche de l'équateur, plus le lagon est profond et inversement (Purdy E.G. et Winterer E.L., 2001). Si les auteurs observent une corrélation entre les archipels des Maldives-Chagos, ils ne parviennent toutefois pas à en expliquer l'origine.

Depuis le XIX^e siècle, la structure particulière des Maldives et plus particulièrement des farus interroge les chercheurs. Pour J.S. Gardiner (1902), ce sont des hauts fonds avec à leurs sommets une île corallienne, alors que, pour A. Guilcher (1953), c'est « la combinaison de la subsidence et des variations glacio-eustatiques quaternaires qui peut permettre de comprendre les farus très complexes des îles Maldives. Les grands atolls des Maldives qui se subdivisent en petits farus se groupent eux-mêmes en immenses ensembles circulaires séparés les uns des autres par des passes profondes de plusieurs centaines de mètres. Ces très grands ensembles circulaires peuvent être dus à la subsidence de très vastes atolls au tertiaire, subsidence trop rapide pour que le corail ait pu pousser partout assez vite pour compenser l'affaissement : là où il perdait pied, se formait une passe rapidement profonde, et l'atoll se subdivisait en une série d'autres moins étendus. Quant aux petits farus, ils peuvent être dus à la répétition du même phénomène à une échelle plus réduite en surface et en hauteur, lors de la transgression flandrienne postglaciaire ». Ainsi, les farus peuvent être des édifices post-glaciaires ayant poussé en anneaux et non linéairement. Pourtant, si l'on suit la division des structures atolliennes établie par A. Guilcher (1954), la subdivision secondaire échappe à cette explication du fait de la grande profondeur des passes entre les atolls eux-mêmes qui comprennent les farus. On peut alors envisager une subsidence préglaciaire rapide, ayant pu avoir les mêmes effets que la transgression postglaciaire créatrice de farus. En 1988, le même auteur envisage que les farus peuvent être des formes taillées par les vents de mousson, expliquant ainsi une quasi-absence dans le sud de l'archipel (Guilcher A., 1988). Stoddart suggère, quant à lui, que leur existence doit être due à une variabilité sous-jacente dans la vitesse de croissance récifale, ce qui expliquerait leur présence au nord et leur absence au sud. Pour E.G. Purdy et G.T. Bertram (1992) «... subaerial erosion of exposed reefs formed karstic saucers on which were formed present-day farues, the ring shaped reefs so characteristic of Maldivian atolls ».

Parallèlement, des recherches ont été menées pour trouver une corrélation entre la distribution des constructions lagunaires et le nombre de passes ou de collecteurs de platier. Ainsi, C. Darwin (1842) estime que leur nombre est à corrélérer avec la largeur et le nombre de passes tandis que, pour C.D. Woodroffe (1989), ces formations récifales immergées semblent liées à leur position par rapport aux chenaux. D'après G. Ciarapica et L. Passeri (1993), l'intense circulation océanique des passes est favorable au développement de petites constructions coralliennes comme les pinacles qui s'élèvent depuis le lagon ou les récifs annulaires comme les farus. Pour E.G. Purdy et G.T. Bertram (1992), ils seraient plus nombreux sur la bordure océanique que sur la bordure interne faisant face à la mer intérieure.

Il a été montré que, pour certains atolls, il existe une relation entre le nombre de passes et le nombre de constructions récifales, notamment les pinacles. Un atoll sans passe en est pauvre, alors qu'un atoll possédant plusieurs passes en est riche. Cette observation semble s'appliquer à nos deux archipels, et plus particulièrement à l'archipel des Maldives (cf. Figure 16). En effet, les atolls qui n'ont aucune ouverture sur l'océan en sont totalement dépourvus tandis que les atolls qui sont bien ouverts en sont riches. Malheureusement, les contre-exemples sont nombreux. Dans un article, A. Guilcher (1991) donne les exemples de l'île de Bora Bora en Polynésie française qui, possédant pourtant de larges passes, est totalement dépourvue de constructions coralliennes, tandis que des îles comme Tetiaroa, Tupai, qui n'ont pas de passe en sont largement pourvues. La présence de fausses passes, même nombreuses, nous laisse interrogative quant à leur implication sur la présence ou non de constructions lagunaires. En effet, même si elles permettent un renouvellement des eaux lagunaires, elles ne peuvent avoir un impact sur l'ensemble de la colonne d'eau.

Il faut alors rechercher un autre lien de causalité. Pour cela, Saller (1984 *in* Guilcher A., 1991) puis F. Rougerie *et al.*, (1986 ; 1990), ont proposé le scénario de l'endo-upwelling géothermique pour expliquer la dolomitisation profonde des lagons d'Enewetak, de Funafuti ou de Midway. Ce processus permettrait d'expliquer la transformation de la calcite et de l'aragonite en dolomite par la précipitation des eaux profondes océaniques qui ont percolé à travers la structure de l'atoll. L'eau profonde, réchauffée par le flux géothermique du volcan sous-jacent, et chargée en nutriments, remonte à la surface en pénétrant l'édifice. La présence de fissures sur le plancher du lagon permet aux eaux profondes, réchauffées et riches en éléments nutritifs, de favoriser la croissance corallienne et, par conséquent, toutes les constructions lagunaires. Des recherches menées dans des forages de l'atoll d'Enewetak ont permis de montrer que la température à l'intérieur des forages décroissait régulièrement (6,4 °C entre 966 et 1 027 m) au fur et à mesure que la profondeur augmentait, ce qui est contraire à ce que l'on peut observer sur les forages continentaux.

Les constructions lagunaires peuvent avoir deux origines supposées. Soit, elles ont été édifiées récemment par le phénomène de l'endo-upwelling géothermique, soit elles peuvent être les témoins d'une plate-forme pléistocène. Dans ce cas, les édifices lagunaires pourraient correspondre aux formes héritées d'une phase de bas niveau marin, retouchées par les variations holocènes. Ainsi, il n'est pas

Figure 16 : Relation entre le nombre de passes et le nombre de constructions lagonaires

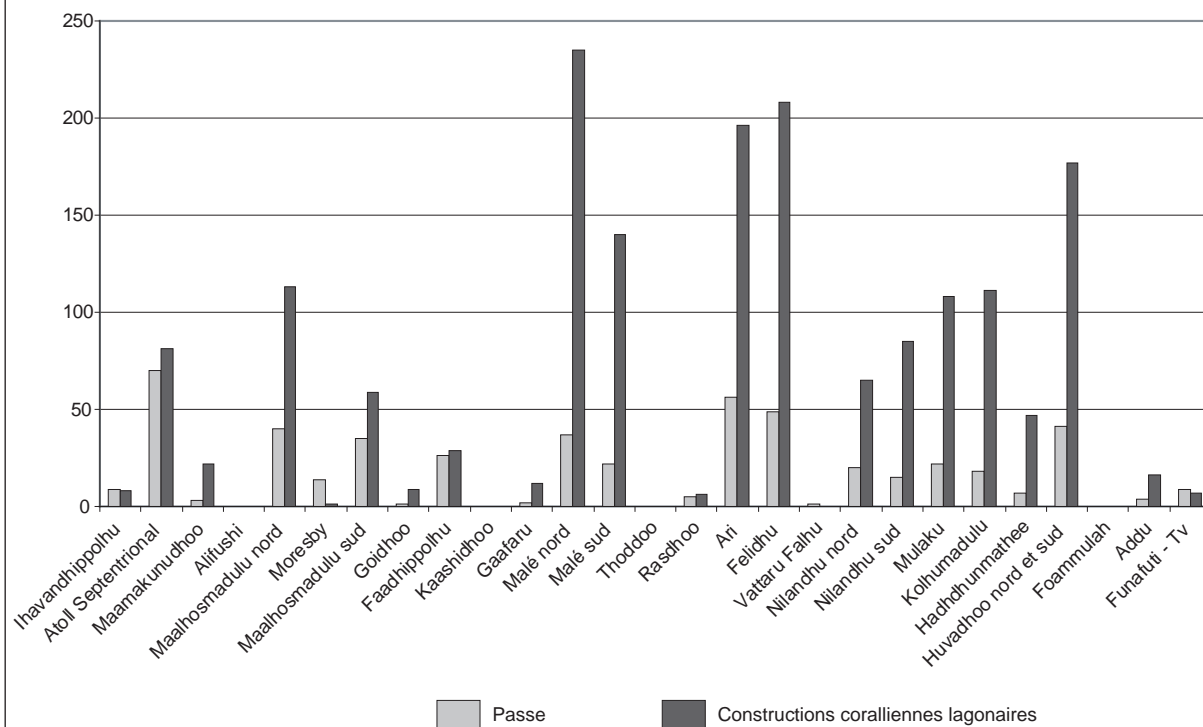
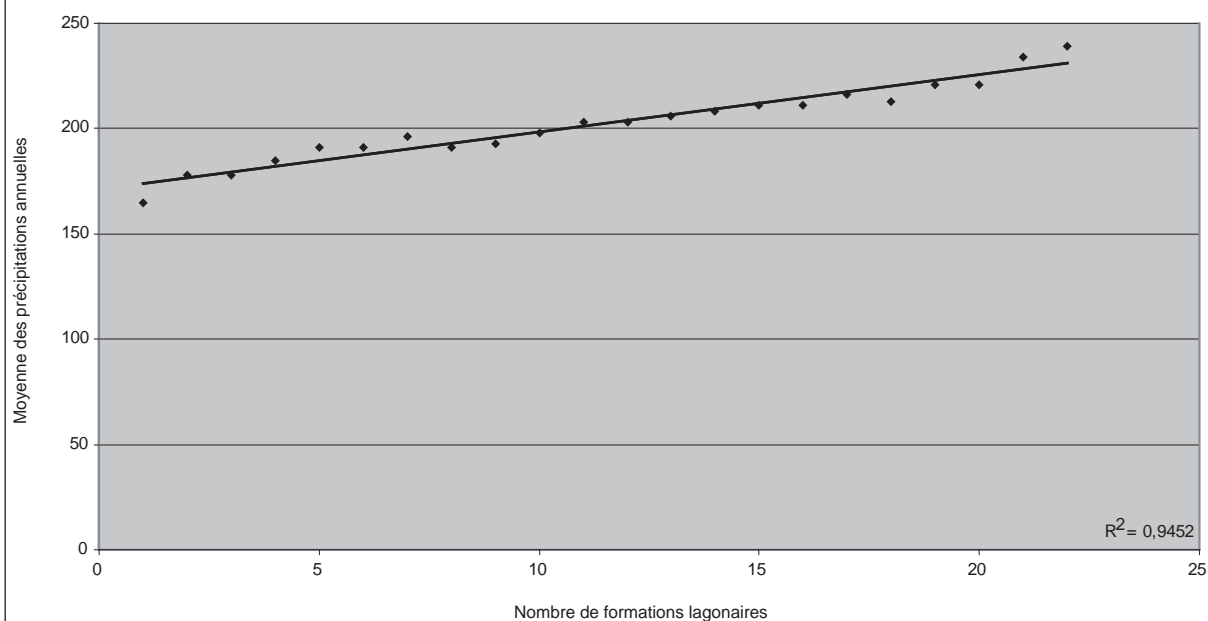


Figure 17 : Corrélation entre le nombre de constructions lagonaires et les précipitations annuelles dans l'archipel des Maldives



exclu de considérer des âges différents avec une base pouvant être pléistocène et une partie sommitale, émergée ou non, d'âge holocène.

Cette multitude de questions concernant la formation initiale des structures atolliennes, des structures lagunaires et des structures intra-lagonaires prouve que rien n'est acquis en morphologie récifale. Si le modèle de Darwin est désormais établi, il nous apparaît évident que les variations eustatiques ont joué un rôle primordial dans l'évolution des formes, même si elles n'expliquent pas tout.

Partant du postulat que toutes les formations intra-lagonaires des méga-atolls de l'archipel maldivien ont peut-être une origine karstique, pluri-eustatique, nous avons souhaité corréler le nombre de ces formations avec les précipitations annuelles (Stoddart D.R., 1971b) sur l'ensemble de l'archipel (cf. Figure 17). Pour cela, nous avons supposé que les précipitations ont peu ou pas évolué depuis la remontée postglaciaire, car il n'existe aucune donnée paléoclimatique. Bien que nous ayons conscience des limites d'une telle démonstration, elle nous est apparue intéressante.

Nous aurions souhaité affiner la corrélation en ajoutant les données sur les vents afin d'observer l'implication générale du climat de mousson dans ces morphologies, mais l'absence de données sur l'ensemble de l'archipel nous en a empêchée.

Ainsi, comme le prouve la courbe tendancielle, plus la quantité de précipitations augmente, plus le nombre de structures intra-lagonaires est important. Sans pour autant voir une morphologie exclusivement eustatique, élaborée durant plusieurs bas niveaux marins, il faut en souligner l'originalité. Le jeu de l'érosion subaérienne et de la dissolution auraient érodé ces méga-lagons au point de les compartimenter. Une fois individualisées, ces structures ont subi, elles aussi, des érosions créant des formes particulières, comme des pinacles, des mini-atolls... Lors de la transgression, les formations coralliennes ont colonisé ces nouvelles structures, les rendant indépendantes et morphologiquement particulières, avec un soubassement régressif et une chape transgressive.

Pour A. Guilcher (1988), si l'absence de ces structures dans le sud de l'archipel ne peut être expliquée par les précipitations, elles pourraient l'être par les vents. Pour C. Darwin (1842) par contre, cela est dû à une augmentation de la subsidence en direction du sud, alors pour Daly (1910) il s'agit d'une défense postglaciaire localisée de la croissance corallienne, et que pour Purdy (1974), il s'agit d'une solution de rehaussement subaérien durant les bas niveaux marins pléistocènes.

Lorsque l'on observe les cartes marines de l'Admiralty Survey (1992a ; 1992c ; 1992b ; 1992d), on constate un gradient de profondeur du nord vers le sud de l'archipel au sein des méga-atolls mais également autour de ces derniers. Doit-on voir en cela une subsidence plus importante du sud de l'archipel ? Une relation avec l'âge des structures ? Plus ils sont jeunes, moins ils possèdent de structures lagunaires et inversement. Pourquoi les farus lagunaires apparaissent-ils surtout lorsque la chaîne insulaire se dédouble ?

La morphologie des méga-atolls est aussi complexe que celle des structures lagonaires. L'élaboration d'une origine plutôt qu'une autre semble ne pas pouvoir expliquer l'ensemble de ces structures. Il faut alors envisager que ces formes ont été modélisées suivant des conditions structurales et environnementales (eustatiques, karstiques, géothermiques...) variant dans le temps et dans l'espace.

1.2. Éléments physiographiques récifaux

Un récif est « un mur de roche corallienne se soulevant presque perpendiculairement depuis l'insondable océan » (Beaglehole, 1962 *in* Stoddart D.R., 1992).

Le récif corallien fascine par ses particularités morphologiques et est très tôt perçu comme une barrière protectrice naturelle face au large : ainsi, dans son récit sur l'archipel des Maldives, F. Pyrard de Laval (1998) qualifie le récif de « grand banc de pierre... qui environne et défend les îles contre l'impétuosité de la mer ». Mais, dans le même temps, le récif est, pour les explorateurs, un danger pour la navigation. Il deviendra à la fin du XIX^e siècle une curiosité morphologique dont les auteurs vont rechercher exclusivement l'origine. Il ne sera considéré comme un important écosystème qu'à la fin du XX^e siècle car il s'avère être le plus productif de la planète : il précipite dans son ensemble plus d'une gigatonne de carbonates de calcium par an, ce qui représente en moyenne 4 kg/m² (Barnes et Chalker, 1990 *in* Bessat F., 1997).

Les récifs coralliens, qui sont des formations organiques constituées par des Anthozoaires hermatypiques et leurs commensaux, se localisent dans la zone intertropicale étendue et couvrent une surface variable suivant les auteurs : 255 000 km² pour M.D. Spalding et A.M. Grenfell (1997), 617 000 km² pour Smith (1978 *in* Spalding M.D. et Grenfell A.M., 1997), 1 500 000 km² pour Copper (1994 *in* Spalding M.D. et Grenfell A.M., 1997). Ils représentent 15 % des espaces côtiers compris entre 0 et 30 m de profondeur (Montaggioni L.F., 2000) dont plus de 50 % d'entre eux sont considérés à risque du fait des activités humaines grandissantes (Spalding et Grenfell, 1997 *in* IPCC, 2001).

Cette différence notable dans la répartition des récifs est due à la précision des mesures effectuées à partir d'images rasterisées suivant un quadrillage de 1 km² et à une définition stricte des récifs coralliens incluant les systèmes récifaux de petits fonds.

Les récifs coralliens des Maldives représentent un des ensembles les plus importants de l'océan Indien puisqu'il totalise 3 500 km² (U.N.D.P., 1999), alors que, dans l'archipel des Tuvalu, on recense 475 km² de structures récifales (McLean R.F. et Hosking P.L., 1991).

Des terminologies particulières ont été utilisées pour décrire la zonation des compartiments d'un récif corallien. Dans cet essai, nous utiliserons conjointement les terminologies de Picard (1967), de Clausade *et al.* (1971) (*in* Pichon, 1978), et de Battistini *et al.* (1975) dans l'ouvrage collectif relatif aux formes du relief des récifs coralliens indo-pacifiques.

La zonation récifale traduit des différenciations horizontales des formations récifales subdivisées en « ensembles ». On appelle ensemble (Picard, 1967 *in* Pichon M., 1978) « une unité du domaine benthique présentant des conditions homogènes suivant des caractéristiques morphologiques, hydrodynamiques, sédimentologiques et bionomiques communes ». Ces phénomènes interfèrent sur les processus de formation de certains éléments morphologiques. Ainsi, les phénomènes sédimentaires participent à la morphogenèse par le transport ou le dépôt de matériaux bioclastiques pas ou peu remaniés ; les phénomènes hydrodynamiques participent à l'évolution des formes mais ne sont pas obligatoirement associées à des actions érosives, tandis que les phénomènes biologiques peuvent donner naissance, dans certains cas, à des morphologies particulières, notamment par la bioconstruction des organismes sécréteurs de calcaire, comme les *Scléractiniaires* et les algues Corallinacées, ou par le blocage de sédiments par les organismes marins qui vont jouer un rôle indéniable dans la construction d'un récif. Ces actions apparaissent donc comme essentielles car elles permettent de déterminer les formes du relief à la surface des récifs. D'après M. Pichon (1978), les ensembles sont divisés suivant des figures morphologiques élémentaires et des figures dérivées (cf. Figure 18). Les premières sont toujours présentes dans un édifice corallien normalement et complètement développé, tandis que les secondes sont soit des subdivisions de détail des figures élémentaires, soit des accidents localisés au sein de ces dernières.

Ainsi, nous identifions sur nos terrains trois compartiments fondamentaux d'après une terminologie employée par Picard (1967), Clausade *et al.* (1971, *in* Pichon, 1978 et par L.F. Montaggioni (1978) : l'ensemble fronto-récifal qui correspond à la pente externe récifale, l'ensemble épircéfale, qui comprend le platier récifal interne et externe des couronnes d'atoll, et l'ensemble postrécifal qui caractérise les éléments du lagon (cf. Figure 19).

1.2.1. L'ensemble frontorécifal

La pente externe (*outer slope*) est la partie antérieure d'un récif, en pente vers le large et de déclivité variable, oscillant entre 30 et 70 % suivant la profondeur du sous-sol marin sur lequel les récifs se sont construits (Battistini R. *et al.*, 1975). Cette bordure compacte peut être bioconstruite ou façonnée par l'érosion. La partie bioconstruite possède une pente escarpée, alors que la bordure océanique issue de l'érosion, quand elle est visible, a un aspect plutôt plan et caverneux. Dans le cas de l'archipel des Maldives, les bords océaniques des atolls sont caractérisés par de fortes déclivités et des pentes d'érosion jusqu'à des profondeurs abyssales de 2 000 m. Les lignes sismiques élaborées à travers les atolls mettent en évidence une pente douce, pour les premiers 150 m, puis une pente de plus en plus escarpée, supérieure à 50°, au fur et à mesure que la profondeur augmente (Aubert O. et Droxler A.W., 1992).

Figure 18 : Distribution morphologique des ensembles au sein d'un récif corallien

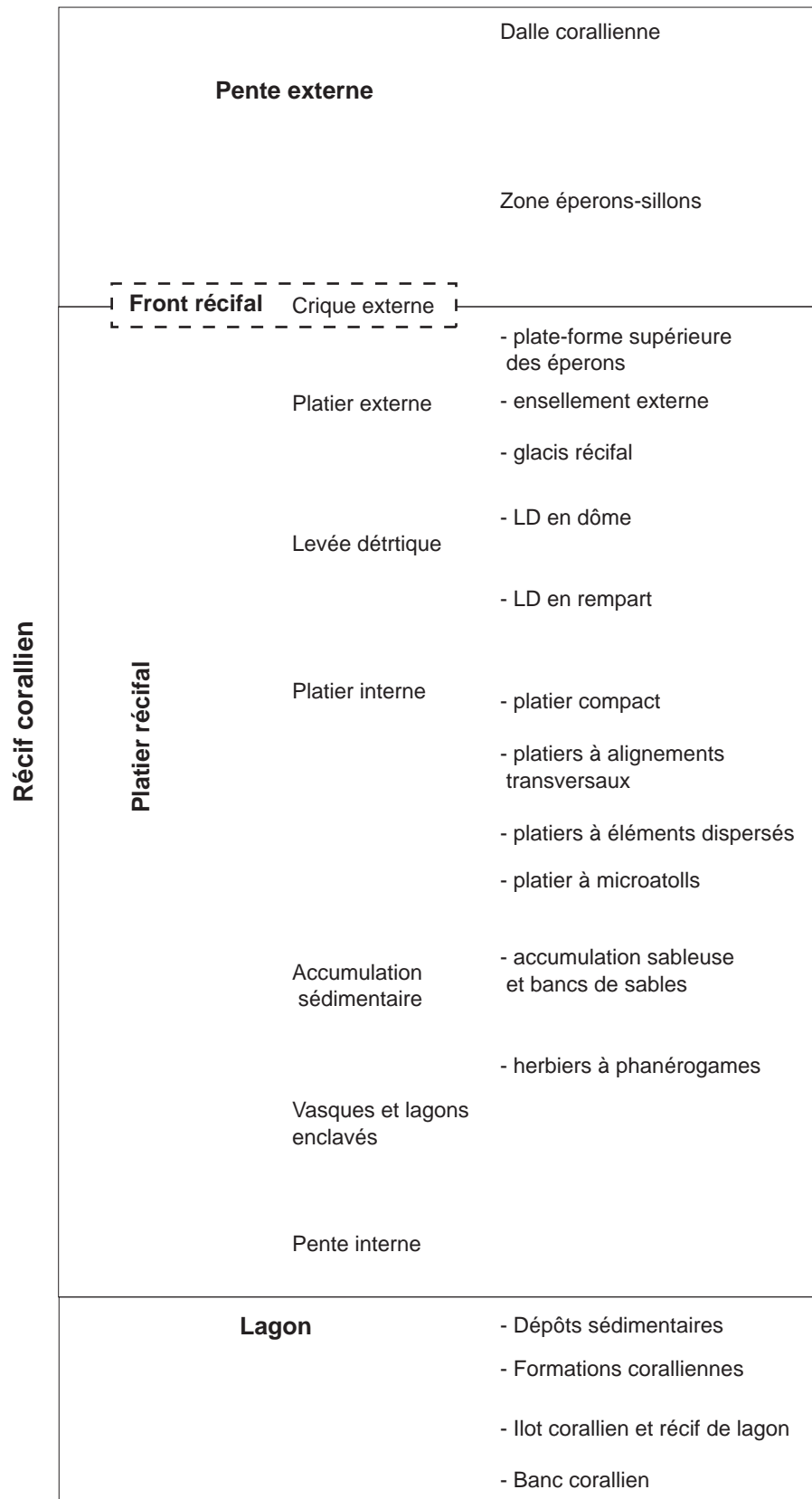
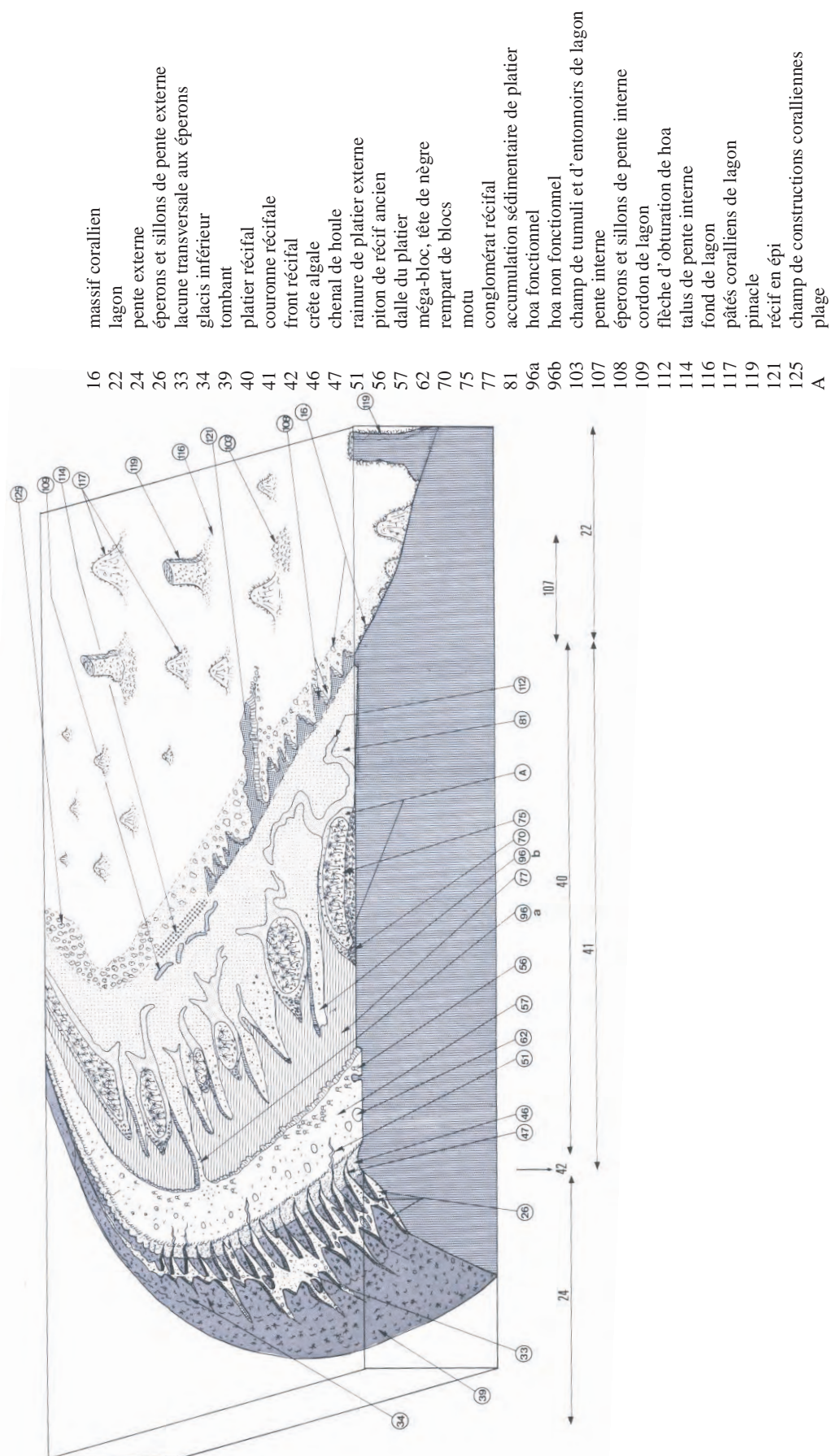


Figure 19 : Bloc-diagramme schématique d'un atoll pacifique (d'après Battistini et al., 1974)



La pente externe est constituée de formations coralliennes et de dépôts sédimentaires à dominance biodétritique (Battistini R. *et al.*, 1975), ainsi que des associations encroûtantes. Elle comprend les peuplements subrécifaux de la dalle corallienne et la zone éperons-sillons

1.2.1.1. La dalle corallienne

La pente externe est composée jusqu'à 20 m environ, par la zone à éperons-sillons, puis, entre 20 et 50 m, par la dalle corallienne. Cette plate-forme, en pente douce vers le large, est composée de *Scléractiniaires* morts et surtout d'algues molles laissant entrevoir la partie antérieure du récif. Cependant dans certains cas, comme nous avons pu l'observer durant les plongées, les éboulis détritiques peuvent recouvrir les formes antérieures car ils se sont amalgamés à l'édifice récifal par des algues calcaires.

Les peuplements à *Echinophyllia* et *Leptoseris* identifiés sur la dalle corallienne des structures récifales des Maldives (Gardiner J.S., 1903) sont directement comparables à ceux étudiés sur le récif de Tuléar (Battistini R. *et al.*, 1975 ; Pichon M., 1978 ; Vasseur P., 1981).

1.2.1.2. La zone des éperons-sillons

Il s'agit d'un « complexe morphologique de la partie supérieure de la pente externe (...), constitué de crêtes ou éperons alignés plus ou moins perpendiculairement au front du récif et alternant avec des sillons » (Battistini R. *et al.*, 1975). Il est donc entaillé, sur sa côte au vent, par de profondes rainures régulièrement espacées qui canalisent l'énergie de la houle et qui se poursuivent vers la crête algale. Les biotopes caractérisés par les *Scléractiniaires*, les *Alcyonaires* et les algues calcaires se développent en mode très battu. Ainsi, les *Lithothamnion* tapissent les sillons et peuvent les recouvrir, les transformant ainsi en tunnels, alors que, sur la côte sous le vent, la crête à *Lithothamnion* est plus basse comme aux îles Kiribati, aux Tuvalu, aux Tuamotus...

En résumé, les éperons et les sillons sont une adaptation du récif par rapport à la houle : les éperons tendent à disperser l'énergie de cette houle et permettent aux organismes de croître alors que les sillons sont le résultat morphologique du retour de houle (Munk et Sargent, 1948).

Le système subit une évolution verticale avec une action de contrôle impliquant une construction par le corail et les algues calcaires, et une érosion par le frottement des éléments détritiques dans les sillons (Vasseur P., 1981). C'est pour cela que cette figure morphologique est la zone de croissance la plus active d'un récif corallien. En effet, cette croissance résulte de deux actions opposées qui sont l'activité des coraux constructeurs et des algues calcaires et leur destruction par hydrodynamisme et par biodestruction. Elle traduit un trait morphologique caractéristique de la zone d'accrétion frontale (Montaggioni L.F., 1978).

Aux Maldives, le système éperons-sillons est moins affirmé, sauf sur la pente externe de l'île de Rasfari où il est bien développé (Matteucci R. et Russo A., 1985), que dans l'archipel des Tuvalu où il apparaît de façon très nette sur la structure océanique de l'édifice (cf. Figure 20), bien que nous n'ayons pas pu vérifier l'ensemble des structures récifales pour l'ensemble de l'archipel.

Cette disposition rainurée du corail vivant, sur la bordure externe est présente aussi bien dans les récifs océaniques très battus du Pacifique que dans les récifs continentaux comme ceux de Madagascar ou de la mer Rouge (Guilcher, 1958 *in* Vasseur P., 1981).

D'après les observations que nous avons pu faire sur nos bordures récifales, la dynamique des vagues sur le récif ainsi que le déferlement et la force de ce dernier sont des éléments majeurs à prendre en considération.

L'implication de phénomène érosif subaérien dans le façonnement de ces formes, notamment la relation entre les morphologies et le degré d'émersion, doit être envisagée. Les récifs maldiviens ont la particularité d'avoir une barrière récifale quasi immergée, même lors des basses mers de vives eaux, à la différence de la bordure récifale orientale des Tuvalu qui subit des émergences-immersions liées aux cycles de marée, ainsi que des aspersions par les vagues brisant à la côte. Selon L.F. Montaggioni (1978), une évolution morphologique de ces structures implique l'espace et le temps, ces formes évoluant suivant des phases d'équilibre avec des stades d'érosion et des stades d'accrétion (Figure n°21).

D'après Picard (1967, *in* Montaggioni L.F., 1978), « la limite hydrodynamique, morphologique, sédimentaire et écologique entre les ensembles fronto-récifal et épirécifal » correspond à la plate-forme supérieure des éperons. En effet, la zone des éperons et sillons de la plate-forme supérieure des éperons correspond à la partie antérieure du platier externe et est profondément rainurée en dents de peigne à la suite de sa progression vers le large.

1.2.2. L'ensemble épirécifal

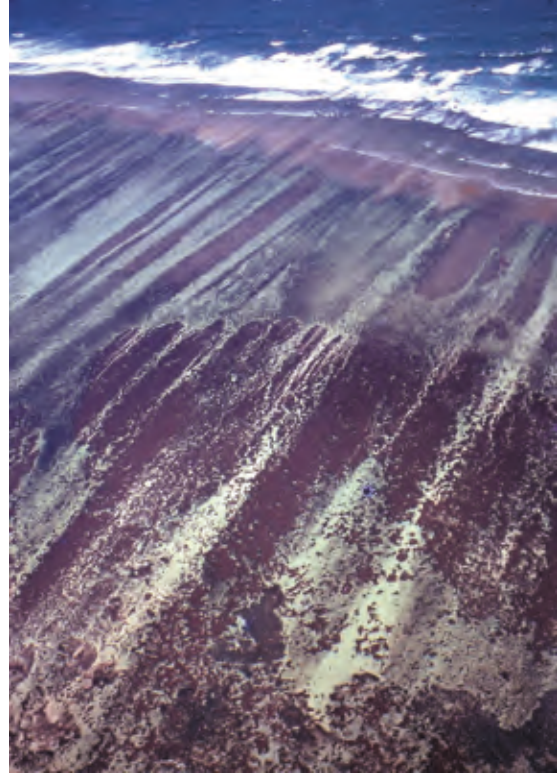
L'ensemble épirécifal est caractérisé par l'intensité décroissante des facteurs hydrodynamiques, depuis le front récifal jusqu'au lagon (Vasseur P., 1981). C'est la zone de transfert et de dépôt de blocs ou d'éléments très grossiers (ensellement externe, glacis, levée détritique), de dépôt de graviers et sables plus ou moins grossiers (formations construites du platier interne), et la zone de rétention des sédiments fins (accumulation sableuse et herbiers à phanérogames). De façon générale, la distribution de peuplements coralliens se fait suivant la loi de correspondance entre les conditions de mode et les formes de croissance (Pichon M., 1978).

Figure 20 : Exemples de morphologies récifales

Zone à éperons-sillons, côte orientale de l'île de Fongafale



Platier à alignements transversaux, Tuléar, Madagascar



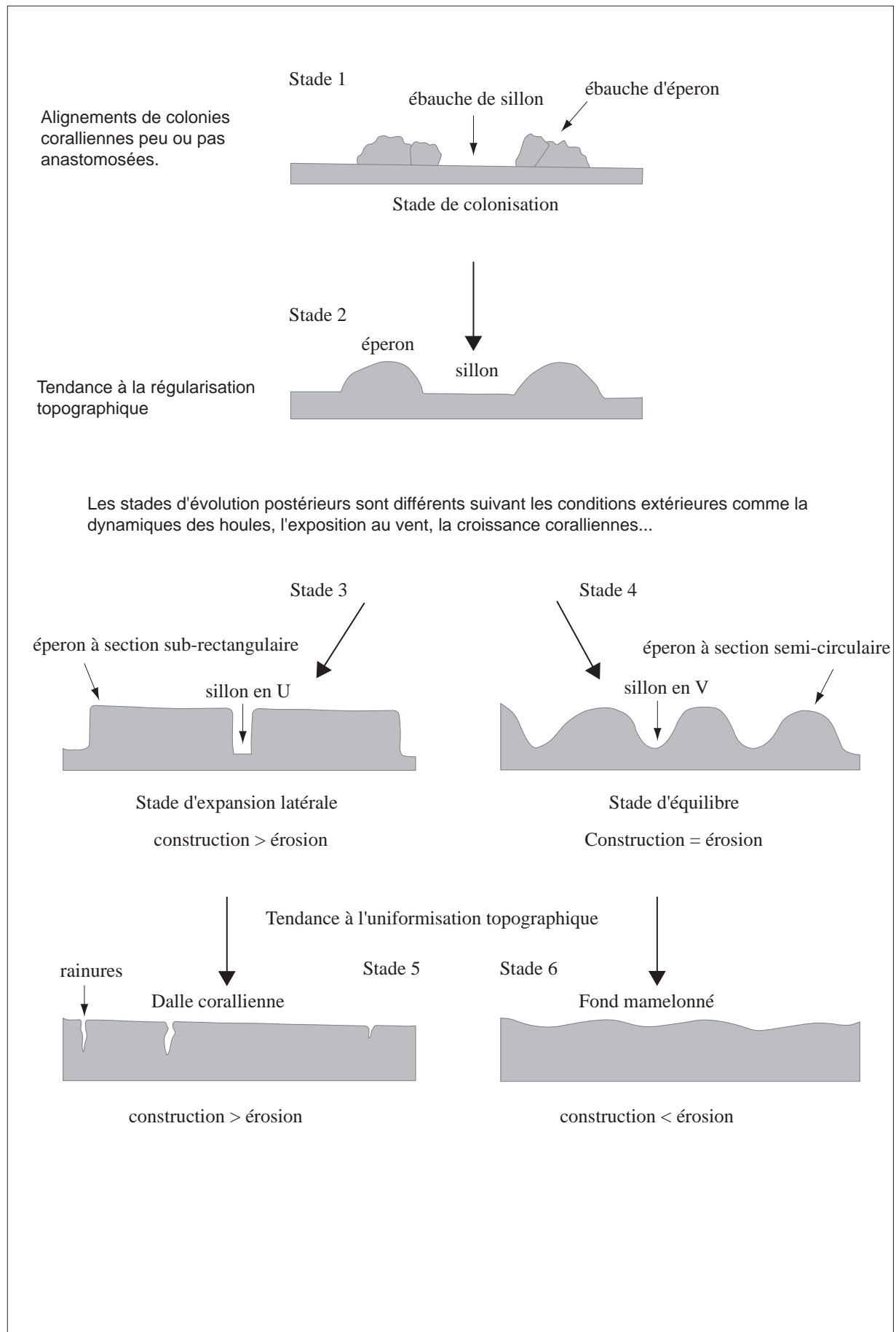
(Cliché J. Laborel)

Levée détritique, Tuléar, Madagascar



(Cliché J. Laborel)

Figure 21 : Evolution morphologique de la zone à éperons-sillons (d'après Montaggioni, 1978)



Ainsi, dans les zones les plus battues, les formes à grandes colonies branchues dominent, alors qu'en mode moins battu, on trouve des colonies massives.

Pour Darwin (1842), les différences morphologiques entre les deux platiers d'un même atoll traduisent une différence topographique lors de la mise en place des coraux, durant le stade initial de développement récifal. A une pente douce sera associé alors un large platier, à une pente plus raide un platier plus étroit. Pour Dana, les différences de largeurs entre les platiers d'un même atoll ont un rapport direct avec les conditions météo-océaniques observables dans l'archipel. Plus les courants situés autour de la barrière récifale, ou sur les platiers, seront rapides et importants, plus les coraux pourront se développer. En effet, ces derniers apportent avec eux des eaux sans cesse renouvelées, riches en éléments nutritifs, en oxygène ... Cet argument montre donc que, par essence, la croissance corallienne horizontale est déterminée par la quantité de nutriments et de minéraux délivrés par les eaux séjournant autour de l'atoll.

1.2.2.1. Le platier externe

Le platier externe se divise, tant du point de vue morphologique que bionomique, en trois structures distinctes : la plate-forme supérieure des éperons, l'ensellement externe et le glacis récifal supérieur. L'exploration des récifs sur nos terrains d'étude s'étant majoritairement faite depuis l'océan, il nous est difficile de décrire les deux derniers éléments morphologiques.

La plate-forme supérieure des éperons est une construction biologique appartenant au front récifal, entièrement concrétionnée et formant un bourrelet qui amortit l'énergie de la houle (Guilcher A., 1954). Elle est composée presque exclusivement de *Scléractiniaires* et d'*Alcyonaires* auxquels sont associées des Corallinacées encroûtantes comme les *Porolithon onkodes* ou *craspedium*.

Cette zone est creusée au sein de la formation corallienne, sous le platier externe. D'après A. Guilcher (1965), « depuis les études américaines sur les îles Marshall, on a plus ou moins pris l'habitude de considérer comme un trait caractéristique des récifs océaniques « la crête algale », constituée d'algues calcaires, et en particulier de *Porolithon*, de couleur rose, qui couronne les récifs du côté externe, dans la partie la plus battue... On ne doit pas considérer la crête algale comme un trait caractéristique des récifs océaniques battus par la houle du large : elle n'existe qu'en certaines régions des mers coralliennes et manque en d'autres, en particulier à Mayotte ». En effet, de nombreux récifs de l'océan Indien et des Caraïbes en sont dépourvus, même en zone battue par les houles. Ainsi, si elle est bien représentée sur les récifs de l'océan Pacifique, comme par exemple aux Tuvalu (David, 1904 ; Rufin, 2001 - cf. Figure n° 20), elle paraît se développer de façon anarchique dans les Caraïbes (Stoddart, 1962, in Battistini et al., 1975) et manquer dans plusieurs îles de l'océan Indien comme à Mayotte, à

Madagascar, à Maurice (Guilcher *et al.*, 1965 ; Montaggioni, 1978 ; Guilcher, 1988) et sur l'île de Rasfari aux Maldives (Matteucci R. et Russo A., 1985), ainsi que, plus curieusement, dans l'atoll de Tarawa de l'archipel des Kiribati (Guilcher A., 1967). Elle peut être si peu présente dans les archipels de l'océan Indien que l'on fait une généralité de son absence. Bien que J.S. Gardiner (1903) n'en n'a pas fait mention lors de son expédition dans l'archipel des Maldives en 1904, elle est toutefois présente sur certains récifs externes battus par la houle océanique (Stoddart *et al.*, 1971 ; Davies *et al.*, 1971 ; Guilcher, 1988) et est bien marquée sur la façade occidentale de l'île d'Hithaadhoo dans l'atoll de Seenu (Stoddart D.R., 1966).

Lorsqu'il en existe, la dominance des algues peut devenir totale et la présence des coraux rare, voire inexistante. La plate-forme constitue un substrat extrêmement caverneux dans lequel se dissipe l'énergie de la houle et sert directement de protection au récif. En fait « ce réseau de cavités n'est bien développé que dans les structures récifales récentes qui présentent généralement un aspect de progression rapide (importance des phénomènes de bioconstruction) » (Pichon M., 1978).

Aux Maldives, la plate-forme supérieure des éperons est assimilable à un trottoir algal, un ensellement externe étroit, à faible taux de colonisation madréporique (Montaggioni L.F., 1978).

Pour que le développement des systèmes éperons-sillons soit maximal, il faut une houle constante, du ressac, des hautes vagues d'énergie et la persistance de la même direction de vent, ce qui favorise ainsi les récifs exposés aux alizés.

Ainsi, plus la houle est régulière et forte, plus la crête algale est marquée, ce qui serait vrai pour les Tuvalu mais faux pour les Kiribati dont il faudrait rechercher l'absence dans le déferlement ou la morphologie du système éperons-sillons sous-jacent.

En effet, durant leur visite de terrain, les auteurs (Guilcher A., 1967) ont été surpris par la faiblesse du déferlement qui supposerait alors que l'alizé serait réduit à la latitude de Tarawa et plus puissant en Polynésie française où aux Tuvalu. Ainsi, seuls les récifs océaniques, où se conjuguent à la fois une grande houle du large et une pente généralement subverticale ou verticale, sont caractérisés par une véritable crête algale.

1.2.2.2. Les levées détritiques externes

L'interprétation de certaines photographies aériennes dans les deux archipels nous ont permis d'observer un amoncellement en arrière du platier externe de fragments biodétritiques qui ont été arrachés au front récifal. On observe un gradient sédimentologique dans le dépôt, de blocs, au plus proche de la zone externe, aux gravelles grossières, dans la zone interne (Vasseur P., 1981). Si ces dépôts sont fréquents dans l'archipel des Maldives, nous avons pu les observer sur la façade occidentale de l'atoll de Funafuti.

Les levées détritiques sont des zones de dépôts en relief sur la partie antérieure du platier récifal (cf. Figure 20). Elles isolent le platier interne (Pichon M., 1978) de l'action de la houle du large et l'érodent par le va-et-vient de leurs éléments sur la dalle du platier récifal.

Du fait de la maturité de développement des platiers récifaux de nos archipels, les levées détritiques et les accumulations sableuses sont bien représentées. Elles constituent les seuls reliefs émergés à marée basse et marquent les limites de l'existence d'une nappe d'eau résiduelle épircifale favorable à l'implantation de formations construites à base de *Scléractiniaires* (Matteucci R. et Russo A., 1985). Les premières sont des levées à alimentation régulière tandis que les secondes peuvent se construire à la fois sur le long terme, par accumulation régulière, ou par des événements ponctuels comme des tempêtes, des cyclones... L'accumulation sableuse s'étale sur toute la moitié interne des platiers récifaux.

1.2.2.3. Le platier interne

Il existe plusieurs formations construites sur le platier récifal interne qui sont contenues entre les levées détritiques et l'accumulation sédimentaire de platier. Leur zonation est conditionnée par la croissance corallienne et l'hydrodynamisme (Caye et Thomassin, 1967 ; Thomassin, 1969 in Vasseur P., 1981).

D'après Picard, (1967), Clausade *et al.*, (1971, in Pichon M., 1978) et R. Battistini *et al.*, (1975), ces formations construites sont classées d'un point de vue morphologique et bionomique en quatre grands types. On trouve, le platier compact (1), le platier à alignement transversaux (2), le platier à pâtés dispersés (3), le platier à microatolls (4). D'après Battistini *et al.* (1975) :

(1) est une formation de *Scléractiniaires* d'apparence compacte, externe, caverneuse dans sa masse, à surface arasée et à consistance friable, qui repose sur un substrat caractérisé par une accumulation de débris coralliens ;

(2) est formé par une alternance de couloirs sableux et d'alignements coralliens qui sont généralement perpendiculaires au front récifal et résultent de la coalescence d'éléments organogènes (cf. Figure 20) ;

(3) est également une formation anfractueuse, d'origine organogène, dont les éléments, ennoyés dans une couche de sable corallien, isolés et dispersés présentent un sommet arasé ;

(4) est une zone où les formations organogènes prennent la forme de microatolls⁸ compacts et anfractueux, sa largeur de la zone pouvant varier suivant l'influence de la houle sur le front récifal : elle représente la dernière étape dans l'évolution du platier interne construit (Vasseur P., 1981).

⁸ Le microatoll est une colonie annulaire d'Anthozoaires ou même d'algues calcaires vivante à la périphérie et nécrosée au centre.

Du fait de l'influence de facteurs locaux sur le platier interne, la prolifération des *Scléractiniaires* vivants est ralentie depuis les levées détritiques jusqu'aux accumulations sédimentaires. Ainsi, juste en arrière des levées détritiques, l'agitation des eaux est encore suffisamment importante pour favoriser la croissance des *Scléractiniaires* qui couvrent quasiment l'ensemble du substrat. Ensuite, plus on s'éloigne du platier externe, plus l'agitation diminue, plus le recouvrement corallien se modifie jusqu'à être ponctuel sur le platier à microatolls (comme à *Porites somaliensis* dans l'île de Rasfari) selon R. Matteucci et A. Russo (1985) au plus proche de l'accumulation sableuse. Plus les coraux morts sont abondants par rapport aux coraux vivants, plus le platier interne devient friable (Vasseur P., 1981).

1.2.2.4. Les dépôts sédimentaires

Bien que leurs localisations dans un atoll peuvent être centrales ou périphériques, nous avons choisi de les présenter dans l'ensemble épirécifal car ils marquent souvent la limite, dans la perception que l'on se fait d'un atoll, entre le platier et le lagon.

Ce sont des éléments morphologiques, de fraction sédimentologique variée, qui peuvent être fixes et durables ou mobiles et éphémères. Ainsi, nous pourrions observer sur nos platier, des dépôts bioclastiques grossiers de dimensions centimétriques à décimétriques évoluant ou non suivant les conditions hydrodynamiques. Leur orientation, leur taille, leur forme dépendent des matériaux qu'ils reçoivent et de la résultante des actions hydrodynamiques qui régissent le régime courantologique présent au sein de l'ensemble récifal.

Dans le langage polynésien, on parle de *motu* pour désigner ce genre de dépôt sédimentaire, alors que, dans certaines îles de l'océan Indien, on utilise le terme de *caye* (ou *caille*) qu'il ne faut pas confondre avec la *caye* (Cay en Am.) qui désigne, dans les Caraïbes et notamment aux Antilles, un platier récifal non émergeant ou peu émergeant. Dans l'ouvrage collectif de Battistini *et al.* (1975), une différenciation est faite entre ces deux éléments morphologiques. Ainsi, un *motu* est « un petit îlot individualisé constitué de matériel détritique de dimensions variables pouvant inclure des blocs et situé sur la couronne récifale d'un atoll (...). Les *motu* sont généralement situés en chapelets séparés par des *hoa* ». Une *caye*, par contre, est une « accumulation hydrodynamique de sables et de graviers indurée ou noir, située à la partie sous le vent d'une plature corallienne isolée. Ils peuvent être submersibles ou émergées avec végétation ».

Si une distinction morphologique existe, il s'avère que, dans la pratique, on utilise l'une ou l'autre terminologie afin de caractériser une île ou un îlot localisé à la fois dans les ensembles épi- et post-récifaux.

Dans tous les cas, ces dépôts sédimentaires correspondent au point d'aboutissement du matériel biodétritique déposé par les courants et les vents dominants (Montaggioni L.F., 1978). Le dépôt de ces matériaux dépasse rarement 4 m de haut par rapport au niveau moyen de la mer. L'apport des

matériaux carbonatés, formés dans le cas des accumulations sableuses par des sables relativement isométriques permettant leur édification, vient des aires productrices épirécifales amont et post-récifales.

Certaines de ces accumulations, lorsqu'elles sont fixes, peuvent avoir une nappe phréatique sous-jacente, contrôlée par les variations du niveau de la mer. Ce sont ces variations qui vont permettre de contrôler en effet le volume, la position et la migration de la lentille d'eau douce dite de Ghyben-Hertzberg (Bourrouilh - Le Jan F.G., 1990).

On peut également trouver au sein des accumulations sédimentaires des dépressions insulaires enfermant de l'eau douce, de l'eau saumâtre ou de l'eau salée suivant l'évolution et la création de cette accumulation biodétritique. Aux Maldives, ces dépressions insulaires portent le nom de *kulhi* ou de *faa* lorsqu'une mangrove entoure cette retenue d'eau. Les mangroves sont assez peu représentées dans l'archipel maldivien comme dans l'archipel tuvaluan. Dans ce dernier, seules les îles de Funafuti, Nanumanga et Vaitupu en possèdent. L'implantation de *Rhizophora mucronata* (Buckley R.C., 1985) a d'ailleurs permis le développement de la plus vaste zone à mangrove dans le nord est de l'île de Fongafale, abritée de l'océan par un cordon de galets. Leur nombre reste inconnu dans l'archipel maldivien, mais les rares références dans les ouvrages nous laissent suggérer une présence assez ponctuelle.

1.2.2.5. La pente interne

Elle est plus douce que la pente externe, et le matériel déposé présente une double origine : épirécifale (sables coralliens grossiers) et autochtone (sédiments organogènes). Les peuplements *Scléractiniares* dans la pente interne sont riches en espèces (la diversité spécifique et la faible extension verticale concentrent les peuplements).

1.2.3. L'ensemble postrécifal

Le lagon est, pour R. Battistini *et al.* (1975) « une dépression de profondeur et d'extension variables, soit située en arrière d'un récif barrière, soit limité de toutes parts par des constructions récifales ». Au delà d'être un nom, il est pour nous un qualificatif. Dans ce mémoire, nous utiliserons le terme de « lagonaire » qui caractérise toutes les constructions, morphologies... présentes au sein du lagon. Nous n'emploierons pas le terme de « lagunaire », qui a injustement pris sa place en morphologie récifale car une lagune est « une étendue d'eau marine (ou saumâtre) isolée par un cordon littoral perméable ou échancré » (Joly F., 1997). D'autres auteurs, afin d'éviter toute confusion, préfèrent parler de « lagon de plate-forme » ou de « mer de plate-forme » (Bourrouilh - Le Jan F.G., 1990).

Cet ensemble postrécifal, de forme irrégulière, renferme la totalité des peuplements de lagon (herbiers à phanérogames, formations construites par les *Scléractiniaires*). Les assemblages coralliens peuvent y être nombreux et les pentes variées, et cela jusqu'au fond sableux de la cuvette centrale. Les sédiments (sables ou galets) présents peuvent être de taille diverse et de type varié. On y trouve des massifs et pâtés coralliens qui comprennent des colonies de très grande taille (supercolonies) sur lesquelles se développent des colonies secondaires. On y trouve aussi des récifs de lagon et, quelquefois, des accumulations sédimentaires émergentes constituées lors des périodes de tempêtes. Toutefois, la zonation y est moins nette que sur la pente externe.

Du fait de la faible amplitude du marnage, c'est la profondeur, à la fois faible et très irrégulière, des zones récifales qui rend les courants de marée très vifs : aussi ils vont jouer alors un rôle majeur dans le transport, le tri et le dépôt des sédiments bioclastiques.

Le fond des lagons maldiviens est recouvert par du sable bioclastique et des petites colonies coralliennes. Les sédiments boueux sont présents uniquement dans les lagons protégés par des récifs continus (Ciarapica G. et Passeri L., 1993 ; Ministry of Construction and Public Works, 1999a) ou en position d'abri comme, par exemple, pour la mer intérieure située au sein de l'archipel maldivien qui constitue un réceptacle sédimentaire caractérisé par des dépôts vaseux (Droxler A.W. *et al.*, 1990 ; Ministry of Construction and Public Works, 1999a) et joue le rôle d'un lagon interne de dimension plurikilométrique.

Soumis aux actions de la marée, de la houe et du vent, le renouvellement des eaux au sein d'un lagon, permettant la réoxygénation des éléments morphologiques présents, peut se faire par les passes, les collecteurs de platiers, notamment à marée haute, et, de façon négligeable, par la couronne corallienne. La marée à l'intérieur du lagon suit généralement celle du large atténuée et retardée par l'effet de passe. Ce phénomène est lié à la largeur et au nombre des passes. En effet, plus une passe est étroite plus le retard de la marée lagonaire est important et son amplitude faible (Tartinville B., 1994). La pénétration de l'eau de mer dans un lagon peut être difficile notamment à marée basse. Il semble toutefois que la couronne récifale de l'atoll de Funafuti soit légèrement en-dessous du niveau de la mer puisque la pénétration, même si elle est diminuée, est assurée à marée basse. Du fait de la profondeur des lagons, le renouvellement des eaux sur l'ensemble de la colonne est difficile et seule la partie supérieure reçoit des eaux ré-oxygénées comme en Polynésie française (Guilcher A., 1967). Dans le cas des atolls méridionaux de l'archipel maldivien, la continuité de la couronne corallienne pose également un problème pour la réoxygénation des eaux internes.

1.2.3.1. Les pinacles et les patates coralliennes

Le lagon est de taille variable et peut être de composition différente. Si le fond est composé généralement de sédiments bioclastiques extrêmement fins, il est rare qu'il soit homogène. En effet, il

peut être accidenté par des constructions coralliennes de type pâtés coralliens et pinacles, mais également par des accumulations sédimentaires sablo-vaseuses. La récurrence de ces formes est variable au sein d'un même archipel et peut être contrôlée par les différentes phases régressives du niveau de la mer.

Les petites constructions coralliennes localisées au sein des lagons se différencient suivant leur taille et leur profondeur. Les pinacles sont des édifices plus hauts que larges, à parois subverticales, tandis que les pâtés coralliens sont des édifices plus larges que hauts, atteignant ou non la surface dans les deux cas (Battistini R. *et al.*, 1975), mais dont leur partie supérieure est composée de corail vivant. Les pinacles sont des formations bioconstruites présentes en grand nombre dans les lagons d'atolls. Il n'est pas rare d'observer des pinacles affleurant à la surface du lagon, ou même émergés à environ un mètre au-dessus du niveau de la basse mer (Guilcher A., 1991), corrélant cette édification avec une élévation minime du niveau de la mer. Cette observation faite en Polynésie française a pu être observée dans d'autres archipels insulaires des océans Pacifique et/ou Indien. D'une façon générale, quand les pâtés coralliens ou les pinacles sont affleurants, leur sommet est toujours arasé.

1.2.4. Les discontinuités morphologiques

Nous n'avons pas jugé nécessaire de décrire les accidents morphologiques mineurs de certaines couronnes d'atolls comme, par exemple, un léger décrochement dans la continuité des structures, une micro-fracture, un décrochement superficiel de type crique externe. Seule, la fausse passe (le collecteur de platier) sera traitée. Sont considérées comme discontinuités morphologiques les passes qui correspondent à des accidents topographiques majeurs interrompant l'édifice récifal et permettant l'échange des eaux entre le lagon et l'océan. Une passe, *ava* en polynésien et *kandu* en dhivehi, est de largeur variable, de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres.

Leur profondeur naturelle est en général de quelques mètres, huit mètres dans les passes secondaires de l'atoll de Funafuti, mais elles ont pu être élargies et draguées pour permettre le passage de bateaux et assurer leur mouillage dans le lagon. C'est ce qui s'est produit pour la passe principale de l'atoll de Funafuti qui a été aménagée afin d'atteindre 13 mètres de profondeur (cf. Figure 22 - annexe). Certains atolls disposent de plusieurs passes : ainsi, ils sont 118 dans l'océan Pacifique à posséder des passes profondes, mais 47 autres en sont dépourvus (Wiens, 1962 *in* Huetz de Lemp A., 1984). Dans l'atoll de Funafuti, il y a neuf passes réelles mais une vingtaine de collecteurs de platiers. La particularité de cet atoll est qu'il est le seul, à l'exception de Nukufetau, qui en a une, à posséder de véritables passes, au sens morphologique du terme. En effet, les autres atolls n'ont que des ouvertures sur l'océan qui ont été aménagées de façon artificielle.

Aux Maldives, les discontinuités morphologiques sont nombreuses, bien qu'une distinction latitudinale soit à noter entre le nord et le sud de l'archipel. En effet, plus on se dirige vers le sud plus les couronnes coralliennes sont continues, et inversement en direction du nord. Ainsi, dans la partie

septentrionale de l'archipel il y a un nombre important de passes : par exemple, 70 dans l'atoll septentrional et 56 dans l'atoll d'Ari, mais peu de collecteurs de platiers. Cette particularité septentrionale est liée à la forme des îles et des récifs puisqu'à une île correspond un récif. Les collecteurs de platiers sont alors extrêmement rares. Toutefois, plus on se dirige vers la partie méridionale de l'archipel, plus les passes sont rares, 4 seulement dans l'atoll d'Addu, plus les platiers sont continus et permettent ainsi l'alternance entre les collecteurs de platiers et les îles.

La largeur des passes, de quelques mètres à plusieurs kilomètres, et leur récurrence est variable. Ceci est également vrai pour leur profondeur, bien qu'elle soit toujours inférieure à la plus grande profondeur observée dans le lagon central. Les parois délimitant les passes sont généralement abruptes et abritent des colonies de coraux bioconstructeurs du fait des conditions hydrodynamiques optimales du côté océanique. On y voit également la continuation des dents de peigne de la pente externe dont l'orientation et le profil changent suivant leur position dans la passe, comme nous avons pu l'observer dans la passe de Goidhoo, ce qui est également commun sur la côte ouest de Madagascar (Guilcher A., 1956 ; Pichon M., 1978 ; Vasseur P., 1981). Côté lagon, les colonies se font rares et souvent elles disparaissent au profit d'une sédimentation importante aboutissant le plus souvent, au débouché des passes, à une accumulation sédimentaire de type dune hydraulique.

Quelles que soient leurs origines il semble que l'exposition des passes face aux houles dominantes du large joue également un rôle prépondérant dans leur évolution. Ainsi, les passes profondes sont localisées sur la côte au vent des atolls, face à la houle dominante, comme dans la plupart des atolls de Polynésie, exception faite des atolls situés en position d'abri par rapport à un autre atoll.

Les phénomènes pouvant intervenir au niveau des passes d'atoll sont très complexes. On observe des passes rentrantes et des passes sortantes. Durant le flot, la passe permet au lagon de se remplir d'eaux fraîches oxygénées, alors qu'au jusant, les eaux plus chaudes se vident après avoir séjourné un temps dans le lagon. Dans des conditions d'ensachage⁹ nul ou faible, et de vent faible, les courants à la passe d'un atoll sont alternatifs en phase ou en retard avec la marée et modulés par celle-ci. Les vitesses des courants à la passe peuvent être importantes. Nous avons pu observer, lors d'une sortie en mer, la présence de tourbillons au niveau de la passe de *Te Ava pua pua* dans l'atoll de Funafuti.

Une fausse passe, ou collecteur de platier ou *hoa* en polynésien, n'est qu'une entaille superficielle du platier. D'après R. Battistini R. *et al.*, (1975), « un collecteur traduit une dépression entaillant la partie interne du platier et pouvant assurer des échanges entre l'océan et le lagon par l'intermédiaire de l'ensellement ». Les collecteurs relient le platier externe au platier interne d'un atoll. Certains d'entre eux, qualifiés de non fonctionnels, peuvent être obstrués par des dépôts sédimentaires grossiers. Entre deux collecteurs de platier, nous avons des îlots sableux de corail détritique (cf. 3.2.c). Lors d'une forte houle, l'eau océanique, une fois passée la crête algale de la côte au vent, s'accumule au niveau du platier externe et est évacuée vers le lagon par ces chenaux. Ils sont alors débitants et permettent au

⁹ Il correspond à une élévation du niveau moyen des eaux du lagon causée par un soudain déferlement d'un train de houle par la couronne récifale.

flot de pénétrer dans le lagon perpendiculairement au récif. Von Arx (1954 *in* Tartinville B., 1994) estime que le niveau moyen de l'eau sur un platier externe est légèrement supérieur d'un demi-mètre à celui du platier lagonaire. L'entrée d'eau océanique par les collecteurs de platier ne se fait pas uniquement lors de périodes de forte houle. En effet, nous avons pu observer pour l'atoll de Funafuti que, par mer calme, une entrée d'eau océanique s'opérait durant la marée haute et disparaissait à marée basse. Cette observation a été également faite sur l'atoll de Tikehau (Lenhardt X., 1991), ainsi que dans l'atoll de Tarawa (Kimmerer et Walsh, 1981 *in* Tartinville B., 1994). Le vent est la cause principale des courants sortants par les collecteurs de platiers. Il peut, en effet, mettre suffisamment en pente le lagon de façon à ce que le niveau sous le vent soit supérieur au platier externe et favorise donc la communication entre les deux masses d'eau. Une passe comme une fausse passe peuvent alors devenir uniquement sortantes si le niveau du lagon dépasse celui de l'océan à marée haute. C'est ce qui semble s'être passé durant le cyclone Bébé de 1972 dans l'atoll de Funafuti. L'élévation du niveau lagonaire de Funafuti dans sa partie ouest, due aux alizés et à l'ensachage, va tendre à accroître les débits sortants.

1.3. Les facteurs écologiques des récifs coralliens

Toutes les formations récifales sont influencées par des facteurs abiotiques (comme la pluviométrie, l'éclairement...) et des facteurs édaphiques (marée, houle...) qui varient selon les océans considérés.

1.3.1. Les facteurs abiotiques et édaphiques

Les conditions écologiques peuvent très légèrement varier suivant les espèces coralliennes et leur localisation géographique au sein de la ceinture intertropicale. La répartition des constructions récifales est associée à celle des *Hexacoralliaires* constructeurs, notamment les *Scléractiniaires*, qui se concentrent dans la ceinture intertropicale. Les *Scléractiniaires* peuvent croître jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 40 mètres. Ce sont leurs algues symbiotiques, les *zooxanthelles*, qui leur imposent des contraintes écologiques très strictes et conditionnent leurs répartitions.

La température de l'eau peut être comprise entre 18° et 35 °C, bien que la température océanique optimale doive être située autour de 26-27 °C. C'est elle qui limite l'extension latitudinale de la croissance corallienne. La profondeur optimale pour la calcification se situe entre 0 et 15 mètres (Montaggioni L.F., 2000) : la présence des photosymbiontes fait que le développement corallien est étroitement lié aux flux lumineux. Du fait de cette caractéristique, il atteint son optimum dans l'étage infralittoral. La calcification de leur squelette est favorisée dans de l'eau de mer sursaturée en aragonite (Montaggioni L.F., 2000).

La salinité doit être comprise entre 35 et 37g/l et ne doit jamais être supérieure à 40g/l ou inférieure à 27g/l. Les *Scléractiniaires* étant sténohalins, ils ne supportent, en effet, ni les fortes salinités, ni les eaux saumâtres. Les constructions coralliennes prolifèrent dans les eaux océaniques oligotrophes¹⁰, généralement au cœur des grandes girations d'eaux chaudes, lumineuses et salées. Elles affectionnent les eaux claires, bien oxygénées et modérément agitées.

L'évaporation et les précipitations ont une grande influence sur les gradients de salinité, de température et de densité de l'eau à l'intérieur d'un lagon. Après de fortes précipitations, la salinité à l'intérieur des lagons varie. Les pluies présentes durant l'été austral dans l'archipel des Tuvalu tendent à dessaler et à refroidir la couche superficielle du lagon. Toutefois, le bilan évaporation/précipitation est nettement positif dans la région créant ainsi une couche de surface salée et chaude à l'intérieur du lagon. Ainsi, les variations saisonnières du bilan évaporation/précipitation entraînent des variations de la température, de la salinité ou de la stratification des eaux contenues dans un lagon.

1.3.2. Les facteurs de la « biogénèse »

Avant de rentrer plus en avant dans l'étude, nous avons souhaité définir les différentes stratifications d'un littoral. En effet, la zonation biologique et géomorphologique est importante à considérer pour nos terrains d'étude car elle structure la disposition des espèces récifales.

L'étage supralittoral est immergé seulement lors des plus fortes marées et/ou des vagues de tempête. Cette zone d'immersion intermittente caractérisée par de fortes variations thermiques est marquée sur les côtes par un grand développement de *Cyanobactéries*. Son extension verticale est très variable en fonction de la région et du mode¹¹.

L'étage médiolittoral connaît une immersion régulière et alternative, l'alternance pouvant être due à la marée ou aux vagues. Le pourcentage d'immersion, très faible à la limite supérieure de l'étage, augmente régulièrement au fur et à mesure que l'on descend vers le niveau moyen de l'eau. Cet étage biologique ne doit pas être assimilé avec la zone intertidale correspondant à l'estran, zone de balancement des marées, et qui englobe donc la partie supérieure de l'étage suivant et la partie inférieure de l'étage supérieur. La hauteur de cet étage peut varier de quelques dizaines de centimètres en mode calme à quelques mètres en mode battu.

L'étage infralittoral est immergé en permanence, même s'il peut être accidentellement émergé dans sa partie haute. Sa limite supérieure correspond à une augmentation forte du pourcentage d'immersion moyenne et surtout à un accroissement très brutal de la diversité des espèces. Cette limite, souvent appelée zéro biologique dans les études sur les variations du niveau marin, est, en général, facile à définir avec précision par l'apparition de ceintures d'algues brunes et, en mers chaudes, des premiers

¹⁰ Pauvres en éléments nutritifs

¹¹ Degré moyen d'intensité des vagues.

coraux. La limite inférieure de l'étage infralittoral est plus difficile à définir car elle dépend de la diminution de la lumière en profondeur.

1.3.2.1. Les organismes bioconstructeurs

On peut identifier comme responsables de l'édification des récifs coralliens les constructeurs végétaux et les constructeurs animaux (cf. Figure 23). En effet, malgré certaines idées reçues, le corail n'est pas seul à édifier un récif.

On trouve respectivement les *Corallinacées* et certaines *Chlorophycées* pour les constructeurs végétaux, et les *Foraminifères*, les *Hydracoralliaires*, les *Scléractiniaires*, les *Vermets* et d'autres groupes, ayant une importance réduite, pour les constructeurs animaux.

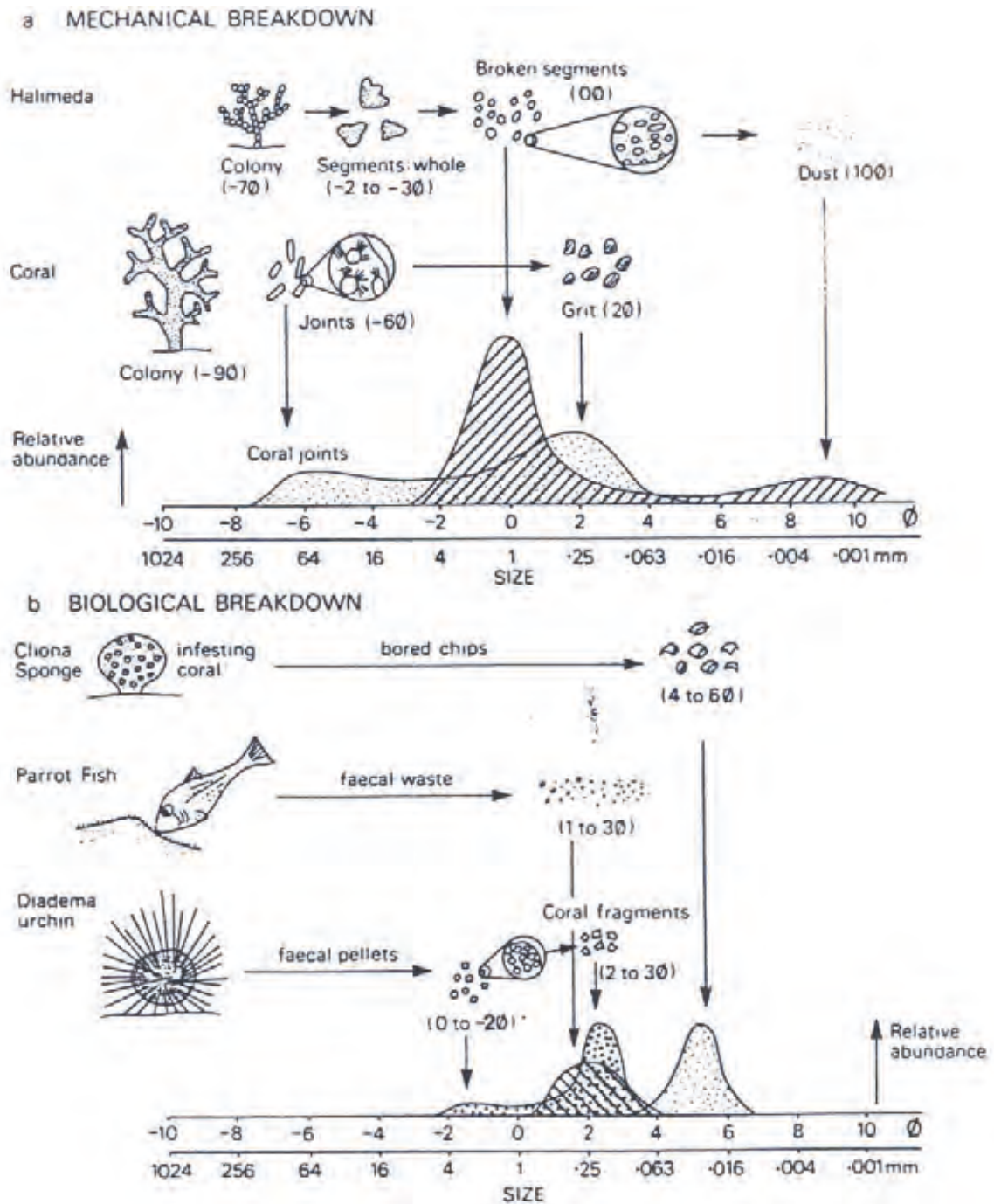
Les *Corallinacées* sont identifiables sur les terrains par leur couleur rouge et leurs formes rameuses ou encroûtantes. Ces algues calcifiées figurent parmi les bioconstructeurs les plus importants à l'échelle mondiale. Elles ont une action importante au niveau des crêtes algales, des bancs profonds et dans la cimentation des récifs coralliens. Elles ont joué un rôle dès le Cambrien et restent encore des bioconstructeurs actuels. Les *Chlorophycées*, qui sont des algues vertes calcifiées, sont à l'heure actuelle des éléments de biodéposition de particules calcaires d'une grande importance dans les régions tropicales. Il s'agit, par exemple, des espèces du genre *Halimeda* très présent sur les récifs de l'océan Pacifique (Tuvalu, Kiribati...).

Les *Foraminifères*, surtout les formes fixées des genres *Polytrema*, *Carpenteria*, etc., deviennent constructeurs de récifs de platier au Crétacé. Importants pour le remplissage de cavités internes dans les constructions récifales, leur rôle est limité en tant que constructeur primaire. Les *Hydracoralliaires*, du groupe des *Millepora*, ainsi que certains Alcyonaires fixés comme *Tubipora* et *Heliopora* préfèrent des secteurs battus par la houle comme sur l'ensemble frontorécifal. Quant aux *Scléractiniaires*, ou coraux, ils commencent à se différencier sous leur forme actuelle et à jouer un rôle important à partir du Trias (Hopley D., 1982 ; Montaggioni L.F., 2000).

On distingue, sur le plan de l'écologie, les coraux hermatypiques et les coraux ahermatypiques. Buddemeier et Hopley (1988) parlent alors de communautés de type « turn-on » ou « turn-off ».

Les premiers sont à la fois constructeurs et symbiotiques avec des micro-algues unicellulaires, les *zooxanthelles*, qui leur permettent d'être autotrophes le jour et carnivores la nuit et qui facilitent de plus leur calcification. Ce sont des agents très importants dans la construction des édifices coralliens des mers intertropicales dont ils édifient la charpente. Ils comprennent de nombreuses espèces (environ 500) et genres très adaptés à la vie en symbiose, dont les deux plus importants sont les genres *Porites* et *Acropora*.

Figure 23 : La génèse des fractions sédimentaires alimentant les complexes récifaux
(d'après Scoffin, 1986)



Les coraux *ahermatypiques* sont, quant à eux, non symbiotiques et peuvent constituer des récifs profonds de grandes dimensions, en eaux froides et obscures.

Les **vermets**, qui sont des mollusques gastéropodes à coquille déroulée et fixée en permanence au substratum, peuvent intervenir soit comme constructeurs secondaires, en se disposant en fines couches, soit comme constructeurs primaires lorsqu'ils élaborent des constructions littorales épaisses notamment au niveau des crêtes algales (Laborel J., 1967 ; Kempf M. et Laborel J., 1968 ; Laborel J., 1986). Ils sont utilisés comme des indicateurs biologiques des variations verticales relatives du niveau marin (Laborel J., 1978 (a), 1978 (b), 1986). La majorité de ces formations se développe dans des mers à marée nulle ou faible (entre 0,2 et 1 mètre de marnage), ce qui limite leur amplitude verticale même si l'influence des vagues peut déplacer sensiblement vers le haut toute la zonation biologique littorale. D'après des expérimentations menées dans plusieurs parties du monde, soumises à des marnages différents, il apparaît que, pour un marnage compris entre 1 et 1,5 m, ils se développent entre 20 et 30 cm au-dessous du niveau moyen, alors qu'avec un marnage de 0,5 m, ils se développent à +10 cm.

1.3.2.2. Les organismes biodestructeurs

Au même titre que les organismes précédents, il existe des organismes biodestructeurs végétaux et animaux qui sont respectivement les Cyanobactéries et d'autres algues, ainsi que les Patelles, les Cliones, des Echinodermes.... Les Cyanobactéries, comme les autres algues (rouges ou vertes), ont la faculté de perforer et de fragiliser le calcaire de la zone littorale ainsi que les squelettes coralliens.

Les **Cliones** sont des agents très importants dans le contrôle biologique de la croissance des récifs coralliens (Goreau T.F. et Hartmann W.D., 1963). Les **Patelles**, quant à elles, ont une action érosive puisqu'elles râpent la roche. Les **Echinodermes** creusent la roche en broutant des organismes végétaux et animaux localisés *in situ* créant ainsi des cupules. *L'Acanthaster planci*, bien que de la famille des échinodermes et bien que destructrice de coraux, notamment sur la grande Barrière de Corail, n'a pas le même impact sur le récif. Elle n'érode pas directement le calcaire en le broutant mais elle provoque la mort des coraux vivants en les digérant. Ainsi fragilisés, les coraux meurent et contribuent à un apport sédimentaire important, largement supérieur aux autres Echinodermes (Gourlay M.R., 1988).

D'autres organismes marins ont également une action sur les constructions coralliennes, comme les vers marins, les organismes lithophages, terme général comprenant les mollusques, des Cirrhipèdes, des Sdipunculiens, etc., ou même les poissons perroquets...

Tous les récifs coralliens ont donc la particularité d'être un ensemble morphologique, biologique et sédimentaire où coexistent à la fois les formes érosives et les formes construites. Les variations des

formes observées dépendent de plusieurs facteurs comme les événements de l'histoire géologique récente, les conditions hydrodynamiques ainsi que la nature et la densité des organismes constructeurs.

Chapitre 2 – La genèse des atolls

2.1. Le volcanisme intraplaque

Lorsque l'on observe un planisphère, on peut être surpris par la disposition des îles de certains archipels océaniques. Il s'agit, pour les plus connues, des îles Hawaï, de la Société, des Tuamotus, des Maldives qui, toutes, s'orientent suivant un même alignement qui est généralement sud-est – nord-ouest ou nord-sud.

Ainsi, l'archipel des Tuvalu s'égrène sur plus de 700 km depuis le banc corallien de Nuilakita au sud-est jusqu'à l'atoll de Nanumea au nord-ouest, alors que les îles Maldives sont disposées sur plus de 800 km depuis l'atoll d'Addu au sud jusqu'à l'atoll d'Ihavandhippolhu au nord.

2.1.1. Définition et origine des points chauds

On attribue l'origine de ces archipels océaniques, dont les chaînes Hawaï-Empereur, Tuamotu-îles de la Ligne et îles Australes-Gilbert-Marshall constituent les archétypes insulaires (Wilson T., 1963 ; Morgan W.J., 1971), à un volcanisme issu du fonctionnement d'un point chaud, lequel génère des îles alignées suivant une même direction car, lors de la sortie magmatique la vitesse de déplacement de la plaque et sa direction sont restées constantes. Ils peuvent alors être considérés comme des référentiels géométriques des plaques. A l'heure actuelle, la vitesse de déplacement de la plaque Pacifique a été estimée à 11 cm/an suivant une direction N115° (Bonneville A., 2002).

Si la théorie du « point chaud » a longtemps été considéré comme un volcanisme expliquant de façon simple l'édification de nombreux archipels, il s'avère que les recherches actuelles mettent en évidence une grande diversité et complexité de fonctionnement. L'activité volcanique de point chaud se fait-elle selon des directions préférentielles dues au développement de contraintes tectoniques le long de zones de faiblesse de la plaque lithosphérique océanique et/ou s'agit-il d'un phénomène volcanique né de la réactivation d'anciennes structures faillées ou zones de fracture ?

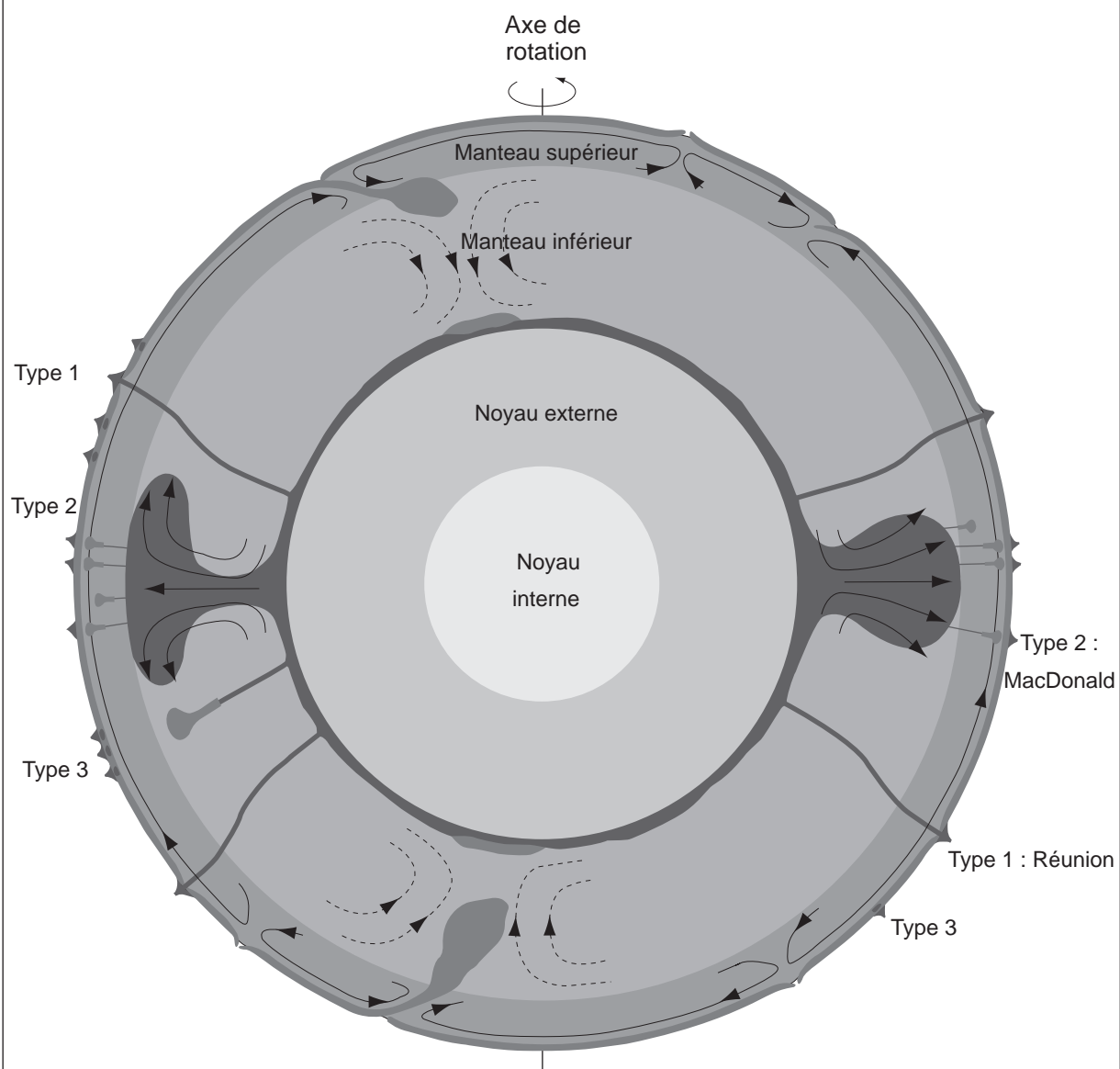
A partir des années 1970 (Morgan W.J., 1971), on considère qu'un point chaud naît de la présence inhabituelle de matériel profond. Une telle anomalie thermique est générée par l'ascension vers la surface de remontées mantelliques sous la forme d'un panache dit « mantellique » (*plume*). D'après cette théorie que nous appellerons « morganienne », le panache a des origines profondes situées dans le « manteau inférieur » (limite noyau-manteau), à environ 2 900 km de profondeur mais est peu étendu puisque l'on estime sa largeur à 100 km de diamètre. Lors de l'élaboration de sa théorie, Morgan avait estimé à vingt le nombre total des points chauds localisés à travers le monde avant que V. Courtillot *et al.*, (2003) en répertorient 49 de trois origines possibles (cf. Figure n°24), la

seule origine mantellique profonde (Morgan W.J., 1972) ne pouvant expliquer l'ensemble des morphologies présentes dans les océans (alignements, plateaux...). Ainsi, la diversité dans l'origine des panaches mantelliques permet d'expliquer la fragmentation des alignements (Courtilot V. *et al.*, 2003 ; Depaolo D.J. et Manga M., 2003 ; Foulger G.R. et Natland J.H., 2003). A l'heure actuelle, il est estimé qu'entre sept et dix points chauds localisés à la surface du globe avaient une origine profonde. La seconde famille se localise entre le manteau inférieur et le manteau supérieur, au niveau de la partie supérieure d'un bombement de type « *superswell* », et est à l'origine d'une vingtaine de points chauds. Les autres, environ une vingtaine également, dits « andersoniens », ont une origine superficielle située dans la lithosphère. Ils ne se créent pas par la percée d'un panache mantellique mais sont générés par une fracturation lithosphérique.

Ces volcans sous-marins se sont donc initiés au milieu d'une plaque océanique à la faveur d'une anomalie thermique provenant de plusieurs origines. Les chercheurs (Wilson T., 1963) pensaient initialement que le point chaud était situé dans le centre d'une cellule de convection mantellique où le mouvement était très lent. La partie supérieure, qui était considérée comme la plus rapide, permettait le mouvement de la cellule de convection, ce qui provoquait un mouvement de la plaque vers le nord ouest, dans le cas de la plaque Pacifique, et induisait de fait la fixité du point chaud.

Les alignements insulaires, marqueurs de la cinématique des plaques lithosphériques, sont solidaires du plancher océanique. En combinant leurs « traces » et en considérant les données paléomagnétiques et les datations radiométriques, on obtient des vitesses de déplacements de quelques millimètres par an, qui remettent en cause la fixité des points chauds (Molnat et Stock, 1987, *in* <http://perso.wanadoo.fr/raphael.paris/>; (Divenere V. et Kent D.V., 1999 ; O'Neill C. *et al.*, 2003). Ainsi, ils ne seraient pas immobiles au cours des temps géologiques. Des études concluent qu'ils évoluent au cours de leur existence mais de façon lente (Duncan, 1981 *in* Duncan R.A. et Clague D.A., 1985). En effet, pour un intervalle de 100 Ma, la vitesse moyenne du mouvement relatif d'un point chaud a été estimée à 0,5 cm/an (Morgan W.J., 1981). Il a été démontré que ce n'est pas la plaque lithosphérique qui a changé de direction dans le cas de l'alignement Hawaï – Empereur il y a environ 42 Ma, mais le point chaud qui a migré (Divenere V. et Kent D.V., 1999). Le virement à 60° correspondrait au moment où le point chaud s'est fixé profondément dans sa position actuelle dans la lithosphère. Cette découverte va à l'encontre de l'indépendance entre la source mantellique profonde créant le point chaud et la structure crustale qui porte les édifices. Certains auteurs (Hieronymus C.F. et Bercovici D., 1999) confirment la non fixité des points chauds et considèrent également l'influence d'événements structuraux régionaux externes comme les contraintes tectoniques, l'influence des éruptions volcaniques antérieures ainsi que la vitesse d'accrétion du plancher océanique sus-jacent.

Figure 24 : Typologie sur l'origine des points chauds (d'après Courtillot et al., 2003)



Type 1 : Origine profonde - "morganien"

Type 2 : Origine peu profonde - "superswell"

Type 3 : Origine superficielle - "andersonien"

Dans certains cas, il a été estimé que la vitesse apparente de migration des points chauds comme ceux de MacDonald et de Rurutu avait été d'environ 10,5 cm/an (Dickinson W.R., 1998) et correspondait au mouvement de 11-12 cm/an de la lithosphère située au-dessous de l'alignement Cook-Australes durant le Néogène. Ainsi, « si les points chauds ne sont pas fixes, les traces volcaniques qu'ils laissent en surface ne reflètent pas exactement le déplacement des plaques sur le manteau terrestre », (Anonyme, 1996).

La complexité dans la compréhension des points chauds est réelle et fait que ce modèle souffre de nombreuses exceptions, comme les archipels d'Hawaï-Empereur ou de la Société. Les dynamiques lithosphérique et mantellique combinées au contexte tectonique local peuvent donc influencer l'activité volcanique dans sa répartition, sa nature et sa durée et rendre ainsi chaque archipel indépendant du modèle théorique de point chaud.

La vitesse et le sens de déplacement des plaques lithosphériques, la géométrie et la puissance du panache mantellique, et le contexte tectonique local influencent la répartition spatiale, la nature et la durée de l'activité volcanique liée au point chaud.

2.1.2. Les alignements insulaires

Avant même de connaître la théorie des points chauds, Stearns (1946 *in* Paris R., 2004) avait proposé un modèle d'évolution pour les alignements insulaires intraplaques, édifiés selon lui le long de fractures linéaires. Ce modèle distingue huit stades d'évolution de l'alignement : (1) le stade sous-marin explosif, (2) le stade bouclier basaltique, (3) le stade de caldeira, (4) le stade trachytique post-caldeira avec construction de cônes de cendres, (5) le stade d'érosion marine et fluviale, (6) le stade de submersion avec formation d'un récif frangeant, (7) le stade de reprise mineure de l'activité volcanique, avec constitution de récifs-barrières, et enfin, (8) le stade de l'atoll avec la submersion définitive de l'édifice volcanique initial.

Ce modèle, incontesté durant plusieurs décennies, a été remplacé dans le milieu des années 1980 par le modèle de Peterson et Moore (1987). L'amélioration des techniques de datation, une meilleure connaissance des données structurales et pétrologiques de ces édifices ont conduit à prendre ce modèle, divisé en sept étapes, comme modèle référent. L'évolution est la suivante : (1) stade sous-marin initial appelé également stade pré-bouclier (*initial stage* ou *preshield stage*), (2) construction du volcan-bouclier (*shield-building stage*), (3) stade de recouvrement (*capping stage*), (4) stade d'érosion (*erosional stage*), (5) stade de reprise du volcanisme (*renewed volcanism stage*), (6) stade de l'atoll (*atoll stage*) et enfin (7) le stade immergé de type guyot (*late seamount stage*). Les phases ainsi considérées relèvent exclusivement de l'activité volcanique et c'est la raison pour laquelle nous avons complété leurs travaux par ceux de Scott et Rotondo (1983 *in* Guilcher A., 1988) qui considèrent l'évolution superficielle des formes de l'île, du stade initial au stade de guyot (cf. figure 25) en

s'approchant du modèle d'évolution de Darwin. Dans l'évolution morphologique des alignements, l'atoll est condamné à disparaître, dans un stade ultime qui est appelé le « Darwin point » (Grigg, 1982), mais, avant cela, l'évolution de l'atoll peut être déclinée selon 12 stades : (1) l'île volcanique sans récif frangeant, comme Mehetia dans l'archipel de la Société, (2) l'île volcanique avec un récif frangeant comme Kusaie dans les îles Caroline, (3) l'île volcanique surélevée avec un récif frangeant comme Oahu dans l'archipel d'Hawaï, (4) l'île volcanique avec un récif barrière et un lagon comme Tahiti dans l'archipel de la Société, (5) le stade du presqu'atoll comme Maupiti dans l'archipel de la Société, (6) le presqu'atoll surélevé comme Atiu dans les îles Cook, (7) l'atoll comme Funafuti dans l'archipel des Tuvalu, (8) l'atoll submergé comme le récif de Pearl et Hermès dans l'archipel d'Hawaï, (9) l'atoll partiellement surélevé avec un lagon ouvert comme Gardner dans l'archipel d'Hawaï, (10) l'atoll partiellement surélevé avec un lagon fermé comme Swains dans les îles Samoa, (11) l'atoll surélevé avec un lagon asséché comme Makatea dans l'archipel des Tuamotus, (12) l'atoll surélevé n'ayant plus la forme initiale d'un atoll comme Niue dans les îles Tonga.

Dans le cadre de cette étude, nous ne nous sommes donc exclusivement intéressée au stade 6 né du volcanisme intraplaque qui reste le seul témoin des chaînes volcaniques, autrefois émergées et bientôt sous-marines.

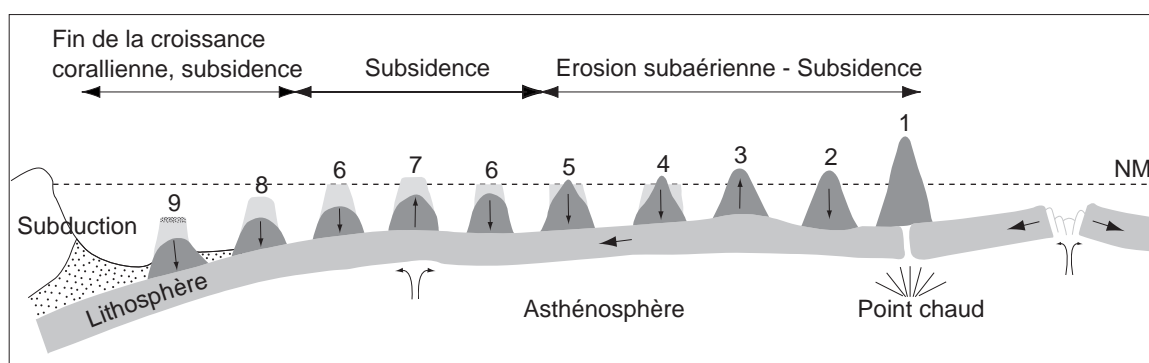
2.2. Quelles sont les origines des archipels étudiés ?

Les Tuvalu font partie d'une traînée volcanique ancienne que nous supposons être continue des îles Marshall au nord-ouest, jusqu'au volcan actif sous-marin MacDonald au sud-est. L'archipel des Maldives correspond, quant à lui, à la partie centrale d'une longue ride volcanique de plus de 2 500 km de long (Avraham Z.B. et Bunce E.T., 1977) comprenant les Laccadives au nord et les Chagos au sud. Si l'on s'intéresse au seul tracé du point chaud, il faut prendre en considération plus de 10 000 km, allant des trapps du Deccan au point chaud actuel situé, à 300 km au sud ouest de l'île de la Réunion (Bonneville A. *et al.*, 1988) ou sous le Piton de la Fournaise (Fretzdorff S. *et al.*, 1998).

La genèse de ces archipels a été fortement conditionnée par les discontinuités structurales de la plaque océanique qui les porte et qui a été à l'origine des principales zones d'alimentation magmatique.

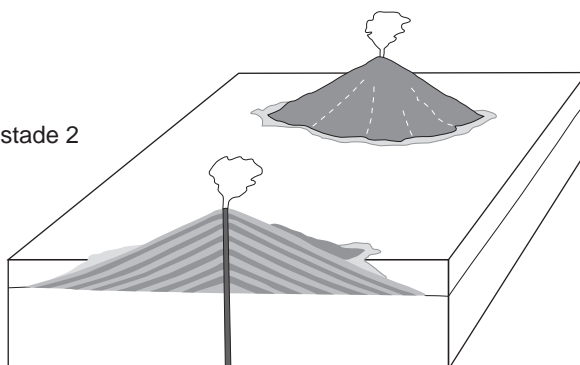
D'après les modèles exposés précédemment, le point chaud de la Réunion et celui de MacDonald ont deux origines différentes. En effet, si le premier semble être de type « morganien », le volcan MacDonald a une origine moins profonde qu'il faut rechercher au niveau de la partie

Figure 25 : Evolution d'une île née d'un point chaud : théorie darwinienne

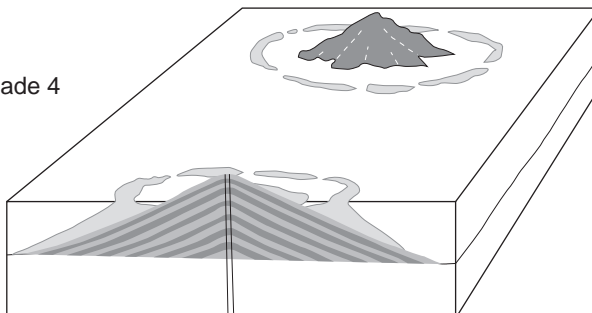


(1) Phase subaérienne - construction du volcan bouclier (2) stade du récif frangeant - affaissement lithosphérique, (3) stade du récif frangeant soulevé - bombement lithosphérique, (4) stade du récif barrière, (5) stade du presqu'atoll, (6) stade de l'atoll, (7) stade de l'atoll soulevé - bombement asthénosphérique, (8) stade de l'atoll submergé, (9) stade du guyot (d'après Scott et Rotondo, 1983, *in* Guilcher, 1988).

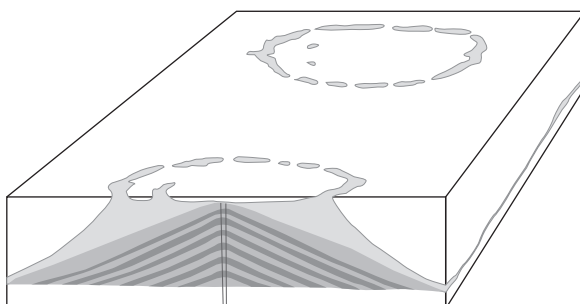
Stade du récif frangeant - stade 2



Stade du récif barrière - stade 4



Stade de l'atoll - stade 6



supérieure du bombement lithosphérique¹² où la largeur du renflement est de 1 250 km (Crough, 1978, in White R. et Mckenzie D., 1989)

2.2.1. L'alignement des Maldives

L'océan Indien, qui porte les Maldives, est divisé en trois plaques lithosphériques majeures, la plaque indo-australienne, la plaque antarctique et la plaque africaine. La lithosphère océanique a été créée il y a 160 millions d'années (O'Neill C. *et al.*, 2003) et porte en son sein quatre zones actives, de type point chaud, que sont la Réunion, Marion, Crozet et les Kerguelen. Le parcours de la plaque indienne sur le panache mantellique est matérialisé par une ride topographique aséismique au fond de l'océan, témoignant du bombement lithosphérique et du volcanisme à l'aplomb de la zone de fusion. En effet, l'accumulation de matériaux magmatiques sous la lithosphère provoque son amincissement et peut causer un bombement topographique (Loper D.E., 1997) en raison d'une augmentation de la température, d'un changement de densité et d'une décompression adiabatique (Paris R., 2004). Cette ride, connue sous le nom de Laccadives-Maldives-Chagos, relie la province volcanique du Deccan à l'île de la Réunion, en passant par l'archipel des Laccadives (64,1 Ma), des Maldives (57,5 Ma), des Chagos (vers 35 Ma), le bassin des Mascareignes (30 Ma), le banc de Nazareth et l'île Maurice (activité sous-marine dès 15 Ma puis aérienne 7 Ma plus tard)¹³. Cet alignement n'est toutefois pas continu puisqu'il existe deux tronçons séparés par l'ouverture de la dorsale centrale Indienne entre les Chagos et le plateau des Mascareignes à partir du Paléocène (O'Neill C. *et al.*, 2003). Le banc basaltique de Saya de Malha est, quant à lui, le pendant, maintenant immergé, des trapps² du Deccan et constitue avec le bloc continental des Seychelles les seuls vestiges de la position initiale, avant la migration de l'Inde (cf. Figure 26).

Ainsi, le point chaud a contribué à la formation des coulées basaltiques massives des trapps du Deccan, pour l'essentiel de sa production, aux environs de 65-66 Ma (Duncan *et al.*, 1990 in (O'Neill C. *et al.*, 2003), 67 Ma pour O. Aubert (1994) et se manifeste sous l'île de la Réunion depuis 5 Ma.

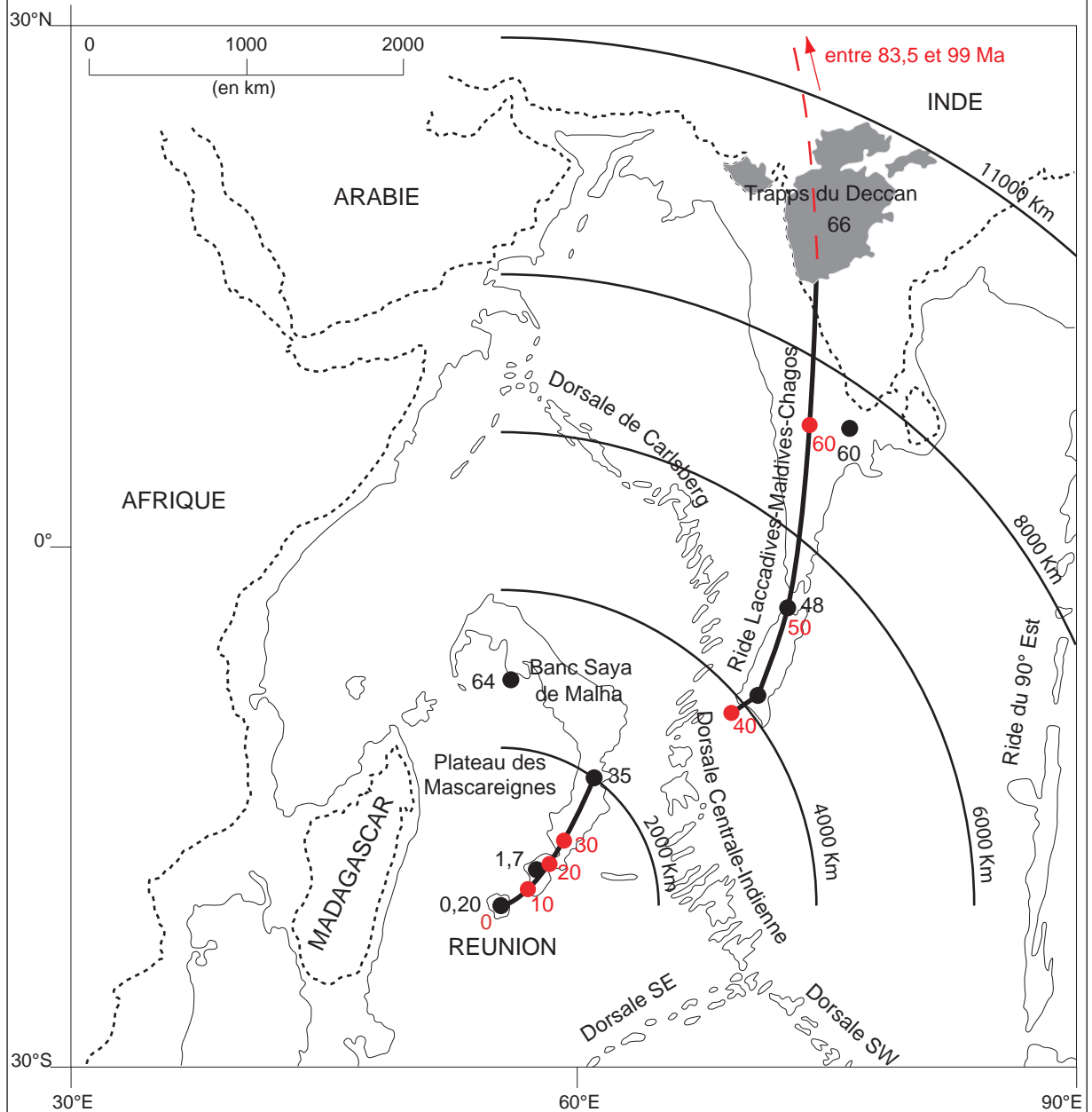
L'on notera toutefois qu'entre le point chaud ayant créé les trapps du Deccan, qui couvrent tout le nord-ouest de l'Inde et la partie méridionale du Pakistan sur une surface estimée actuellement à plus de 500 000 km², par rapport à une extension initiale estimée à 1 500 000 km² (Vincent P.M., 1994), et celui qui se localise sous La Réunion, le taux de production magmatique s'est considérablement affaibli.

¹² *superswell*

¹³ <http://perso.wanadoo.fr/raphael.paris/>

¹⁴ marches d'escalier en suédois

Figure 26 : Traînée volcanique laissée par le point chaud : des trapps du Deccan à la Réunion



- Limite des terres émergées
- Isobathe 3000 m
- Traînée volcanique
- 48 Datation (en Ma) - (1)
- 10 Datation (en Ma) - (2)

Il s'agit de la traînée volcanique laissée par le point chaud lors de la remontée de l'Inde vers le NE. L'interruption entre la ride Laccadives-Maldives-Chagos et le plateau des Mascareignes correspond à l'expansion océanique depuis le passage du point chaud sous le rift. Le banc basaltique de Saya de Malha est le pendant immergé des trapps du Deccan. La partie "pré-Deccan" identifiée par (2) montre une phase volcanique marine du point chaud de la Réunion remontant à 99 Ma.

d'après White et McKenzie, 1989 (1) ; Purdy, 1992 ; Vincent, 1994 ; Mahoney et al., 2002 (2)

L'archipel des Maldives est donc né d'un point chaud (Morgan W.J., 1972). Ce n'est que récemment que des correspondances entre les basaltes des trapps du Deccan et ceux de la ride Laccadives-Maldives-Chagos ont pu être établies, notamment par la méthode de datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Les travaux réalisés par Duncan-Hargraves (1990), Duncan et Pyle (1988) et Courtillot *et al.* (1988) ont montré que plus on se déplace vers le sud de l'alignement, plus les basaltes sont jeunes, étayant ainsi une certaine conformité avec le modèle darwinien.

Cette ride est complexe du fait du grand nombre d'atolls qui la composent : 12 atolls dans les Laccadives, 26 aux Maldives et 5 dans l'archipel des Chagos.

La ride volcanique, sur laquelle s'est développé l'archipel des Maldives, représente donc un segment du passage d'un point chaud à la verticale de la plaque. Il a été déterminé que ce point chaud a généré cette ride aséismique entre le Paléocène (entre 65 et 53 Ma) et l'Eocène (entre 53 et 34 Ma). La particularité des Maldives réside toutefois dans le fait que la partie centrale de l'archipel est double. Le volcanisme qui a donné naissance à cet alignement dédoublé s'exprime en alternance de chaque côté de celui-ci : on parle alors de « *dual line* » (Hieronymus C.F. et Bercovici D., 1999 ; Paris R., 2004).

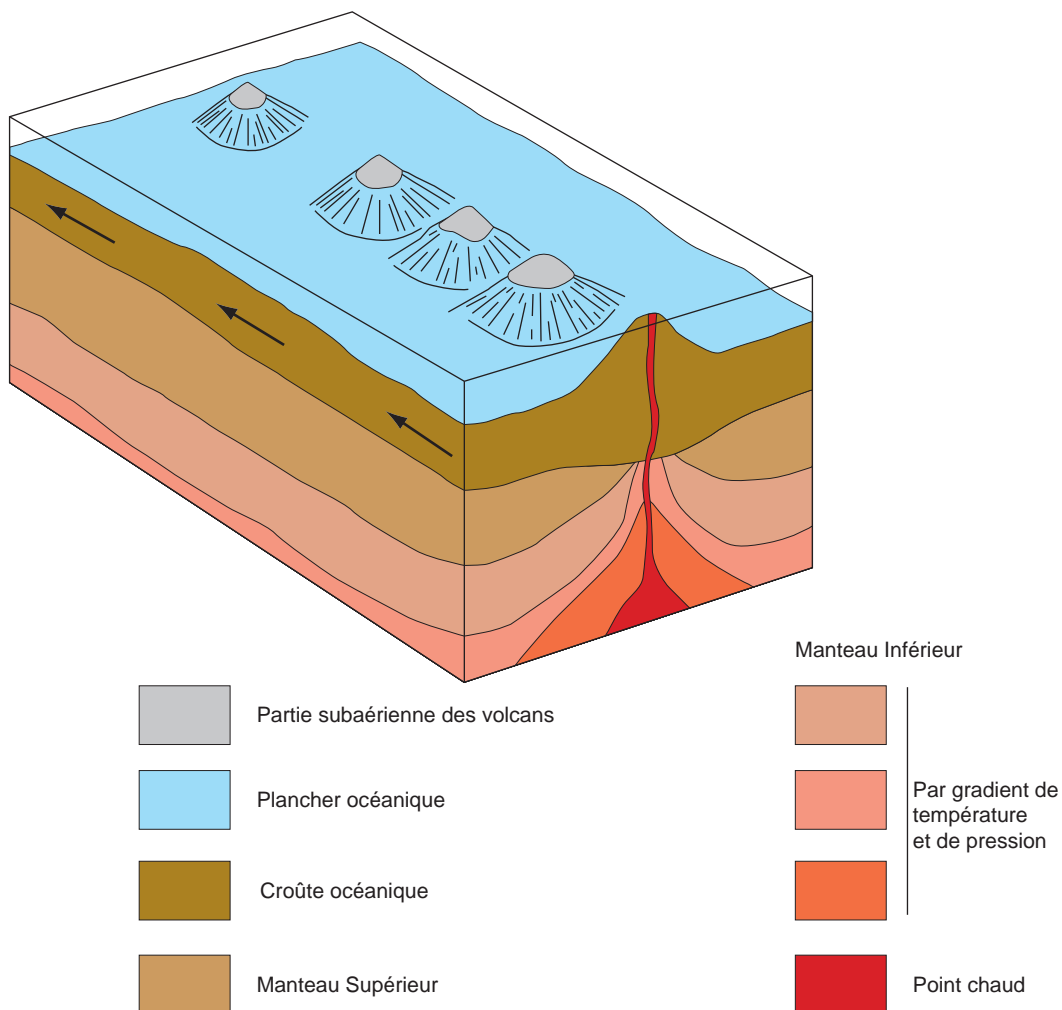
Durant la genèse d'un alignement d'îles à l'aplomb d'un point chaud, alors que chacune d'elle se forme, les îles nées précédemment exercent une surcharge sur la lithosphère, matérialisée par un affaissement flexural et un bombement périphérique compensateur. Les remontées mantelliques subissent progressivement les effets compressifs de cette surcharge et tendent alors à se disperser dans le sens du mouvement de la lithosphère. La distance entre chaque île dépend alors de l'élasticité et de l'épaisseur de la lithosphère, mais aussi de la géométrie des contraintes exercées par chaque île (affaissement et bombement). Un changement dans la direction du mouvement de la lithosphère place les contraintes compressives en dehors du nouvel axe de l'alignement en formation, bloque les remontées magmatiques le long de cet axe et les dédouble en une « *dual line* ». Le volcanisme s'exprime alors en alternance de chaque côté de l'axe le long duquel se construit l'alignement dédoublé. Cette morphologie est liée à la position structurale des points d'émission magmatique dans le volcan, ceux-ci sont disséminés le long d'axes à partir desquels la lave s'écoule.

Dans le cas présent, l'axe oriental des Maldives constitue l'axe principal d'alimentation magmatique tandis que l'axe secondaire regroupe les îles occidentales. L'arrêt dans l'approvisionnement magmatique de l'axe secondaire peut être dû à l'éloignement de son conduit magmatique par rapport au conduit principal, ou alors à une reprise de l'alignement initial du fait d'une nouvelle direction dans le déplacement de la lithosphère (cf. Figure 27).

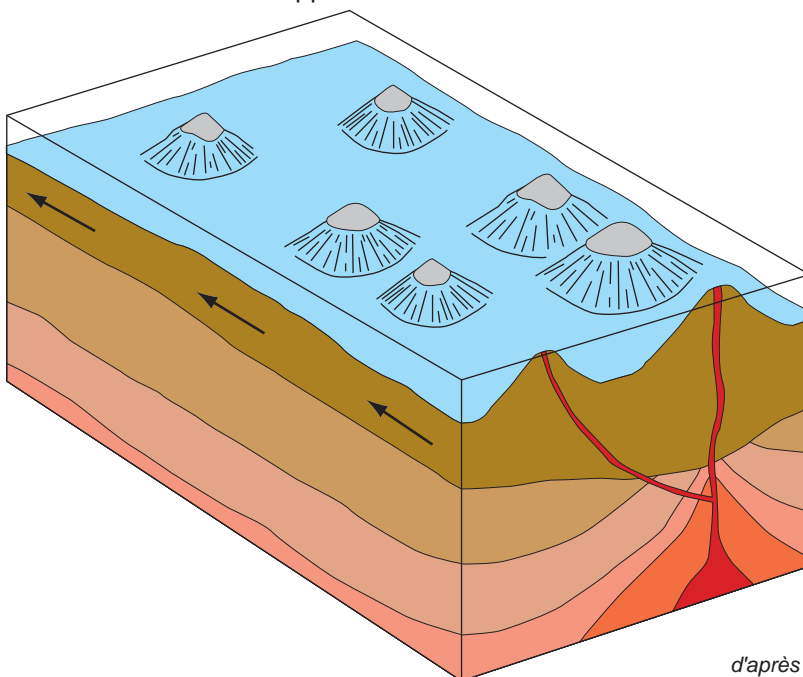
Des remarques sont toutefois à formuler lorsque l'on observe la direction majeure de l'alignement avec la position actuelle du point chaud. En effet, nous pouvons nous interroger sur l'origine et sur la corrélation qui existe entre la localisation actuelle de l'alignement et celle du point chaud actif. Dans un premier temps, il a été estimé, grâce aux données paléolatitudinales, que le point chaud de la Réunion avait dévié au nord de 5° entre 55 et 35 Ma (O'Neill C. *et al.*, 2003). Désormais, il

Figure 27 : Fonctionnement et approvisionnement magmatique du volcanisme de point chaud

A : Alimentation simple : le cas des Tuvalu



B : Double alimentation supposée : le cas des Maldives



d'après Bonneville A., <http://www.ipgp.jussieu.fr>

est établi que le point chaud a dévié au nord-est depuis les derniers 65 Ma et que durant cette période il a été mobile dans le manteau.

A l'heure actuelle, certains chercheurs remettent en cause le modèle de panache mantellique pour expliquer la ride Chagos-Maldives-Laccadives ainsi que les trapps du Deccan (Sheth H.C., 2002). La mise en place de l'alignement traduirait une intrusion de matériaux volcaniques à travers une fissure qui court le long de la zone de fracture dite de Vishnu (Sheth H.C., 1999). Il en serait de même pour l'île de la Réunion qui se situerait le long de la zone de fracture de Maurice. Les monts sous-marins localisés entre l'alignement Laccadives-Maldives-Chagos et l'île de la Réunion reflèteraient alors le régime de contrainte de la lithosphère océanique indienne et non le déplacement de cette dernière. Il attribue l'origine du Deccan non pas à « un hypothétique panache » mais à une méga fissure lithosphérique de type rift. Lorsque la fracturation est survenue, séparant la plate-forme des Seychelles d'avec l'Inde, c'est l'ensemble de la plaque qui a été concerné. La plaque va s'amincir par érosion thermique, se soulever et provoquer un bombement thermique. Le magma, provenant de l'asthénosphère va être piégé à la base de la croûte et la fracturation, liée au bombement, va permettre aux matériaux d'arriver très rapidement en surface et aboutir à terme à une rupture continentale de grande ampleur. Cette théorie rejoint donc celle développée par Anderson (Anderson D.L., 1998, 2000) qui considère que le volcanisme de « *mid-plate* » est contrôlé par la structure, les contraintes et les fissures lithosphériques et non par un panache mantellique profond, certains localisant l'origine du magma à moins de 40 km sous la surface des océans (Prakash Pandey O. et Negi J.G., 1987).

Pour d'autres (Avraham Z.B. et Bunce E.T., 1977), le segment des Maldives correspondrait à un ou des micro-continent dérivant depuis l'Inde, alors que le reste de l'alignement aurait deux origines volcaniques, l'une issue d'un point chaud et l'autre d'une faille transformante, durant la dérive nord-est du continent indien. Il a été également suggéré qu'une longue faille transformante latérale gauche aurait pu exister, à proximité de la localisation du point chaud, produisant ainsi la principale compensation d'anomalies magnétiques observées dans le sous-sol océanique de l'archipel des Maldives et dans d'autres sites de la ride Chagos-Laccadives.

Une remise en cause constante de l'origine des trapps du Deccan et de l'île de la Réunion a une répercussion directe sur l'origine même des Maldives, bien que l'évolution morphologique latitudinale de l'archipel conforte une origine volcanique et une évolution de type point chaud.

Plus récemment, des profils sismiques réalisés sur le soubassement volcanique de l'archipel ont révélé que le plateau volcanique des Maldives avait été généré lors de deux phases éruptives distinctes, de type point chaud, séparées par un épisode de déformation tectonique (Belopolsky A.V., 2000). L'évolution de l'archipel se serait donc organisée suivant deux phases majeures :

- de l'Éocène au bas Oligocène, la structure du soubassement joue un rôle primordial dans la distribution géographique et la mise en place de la production carbonatée ;

- de la fin de l'Oligocène à maintenant, l'évolution de la plate-forme carbonatée a été contrôlée par les fluctuations du niveau relatif de la mer.

L'explication de l'évolution de la chaîne des Maldives est ambiguë car elle est à la fois un alignement volcanique et une plate-forme carbonatée recouverte localement par plus de 3 km de sédiments. Ces particularités font qu'il faut rechercher à la fois une explication structurale et une explication eustatique dans son modèle actuel.

2.2.2. L'alignement des Tuvalu

Si l'archipel des Maldives fait l'objet de recherches constantes concernant son origine, celui des Tuvalu reste empreint de mystère. En effet, jusqu'à présent le point chaud ayant donné naissance à cet archipel n'a pas été clairement identifié, ce qui laisse libre cours à plusieurs interprétations.

Les données disponibles sur la formation géologique de la chaîne insulaire des Tuvalu sont quasi inexistantes, sauf pour l'atoll de Funafuti, tant et si bien que les âges d'édification puis d'évolution des îles ne sont pas véritablement connus mais supposés.

Les roches éruptives des atolls de la chaîne des Tuvalu sont pétrographiquement inconnues (Sinton *et al.*, 1985, *in* Locke C.A., 1991). Les échantillons basaltiques et gabbroïques qui ont été prélevés dans le sud de la chaîne volcanique sous-marine correspondent au matériel du plancher océanique avoisinant. Du fait de l'absence d'une origine clairement définie, nous pouvons alors envisager deux hypothèses pour la chaîne insulaire, issue soit d'un point chaud, géographiquement éloigné, soit de l'existence d'une ancienne ligne de crête volcanique abandonnée, dont l'origine est inconnue.

D'après W.J. Morgan (1972), les archipels Marshall-Gilbert-Tuvalu appartiendraient à une même chaîne volcanique insulaire datant du Crétacé mais dont le point chaud fait l'objet d'hypothèses : la première concerne le mont sous-marin MacDonald, la seconde s'intéresse à un point chaud localisé aux îles Cook. En effet, pour Richard Gordon¹⁵, le point chaud qui aurait créé l'archipel des Tuvalu se situe à l'heure actuelle à proximité de l'île de Rarotonga (sud des îles Cook) dont l'âge avoisinerait les 50 Ma.

Le volcan sous-marin actif MacDonald, découvert en 1967 grâce à des hydrophones (Bardintzeff J-M., 1998), se localise précisément au sud-est de l'archipel des Australes. Son émergence paraît imminente : entre 1969 et 1975, des reconnaissances ont estimé son sommet à 49 m sous la surface de l'océan, alors qu'entre 1981-1983, le plateau sommital se situe à - 40 m, et elle est accompagnée de la surrection d'un piton central à 27 m de profondeur.

¹⁵ Department of Earth Science, Rice University – Houston – USA (Communication personnelle)

D'après ces deux hypothèses, les points chauds auraient permis la création d'un alignement volcanique qui regrouperait les archipels Marshall-Gilbert-Tuvalu-Cook-Australes, respectivement du nord-ouest vers le sud-est, et serait le plus long et le plus vieux répertorié dans le Pacifique avec un âge estimé à 140 Ma (cf. figure n°28).

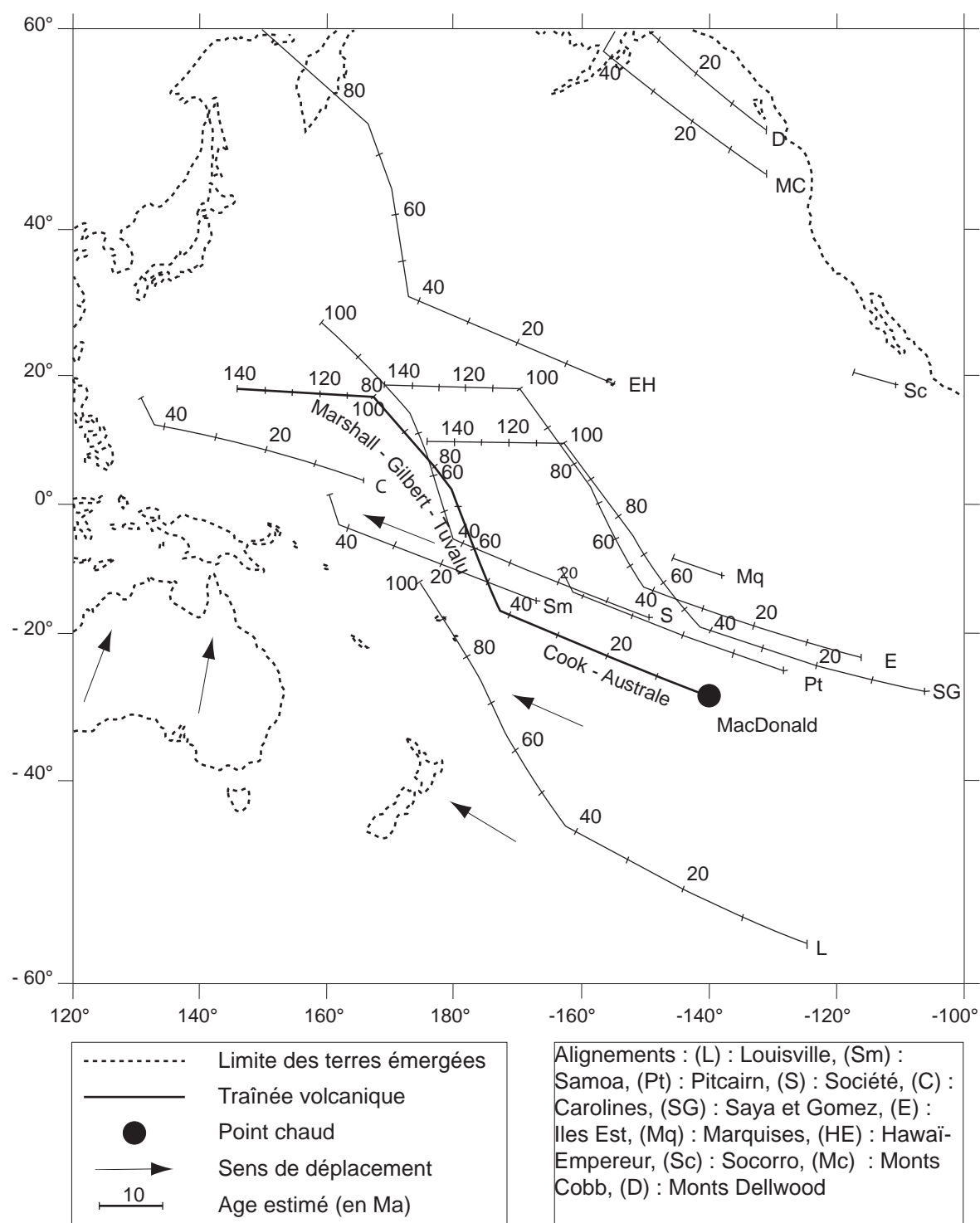
Pourtant lorsque l'on observe la complexité d'édification d'un seul alignement, on peut s'interroger sur la faisabilité de la construction magmatique pour les cinq archipels cités précédemment. Par exemple, pour le seul archipel des Cook-Australes, A. Bonneville (2002) considère qu'au moins trois traînées volcaniques, disposées du nord vers le sud ont permis la création de cette seule ride volcanique, dont l'âge a été estimé à 46 Ma (White R. et Mckenzie D., 1989), et qui s'étend sur plus de 2 200 km depuis le volcan MacDonald jusqu'à l'île d'Aitutaki. De plus, il a été estimé (Bonneville A., 2002) que :

- le point chaud issu d'un « super bombement » a une durée de vie limitée, comprise entre 10 et 20 Ma, ce qui irait donc à l'encontre de la trace volcanique allant des Marshall aux Australes, à moins qu'il y ait eu réactivation magmatique dans l'alignement ;
- plusieurs points chauds peuvent être actifs simultanément, même sur un espace réduit, comme en témoignent les alignements Cook-Australes où le volcanisme s'est concentré dans un rayon inférieur à 1000 km. Ces anomalies peuvent être traduites par l'existence de plusieurs points chauds sur un même alignement ou par l'existence d'une ligne chaude (Turner et Jarrard *in* Guille G. *et al.*, 1993).

Ces volcans sous-marins peuvent être repérés par leur activité sismique et plus spécifiquement par les anomalies altimétriques et magnétiques du géoïde (Bardintzeff J-M., 1998). Ainsi, l'absence d'anomalie magnétique du sous-sol de cette zone du Pacifique nous laisse toutefois supposer que l'alignement a dû se former au Crétacé dans une période de tranquillité « magnétique » *a minima* entre 83 et 118 Ma (Cox 1983, *in* Duncan R.A., 1985). D'autres auteurs comme T.M. Brocher (1985) suggère également un âge Crétacé (de – 135 Ma à- 65 Ma) des édifices, par la présence de larges platiers récifaux. De plus, les analyses menées sur l'atoll de Nukulaelae, qui est le plus septentrional de l'archipel (« its elliptical atoll morphology, well-developed barrier reef, narrow free-air gravity anomaly, and unusually-oriented residual magnetic anomaly ») indiquent une origine contemporaine de la lithosphère et un âge estimé à $82,6 \pm 1,2$ Ma pour le plancher océanique proche (Duncan R.A., 1985).

Si l'on suppose que l'archipel s'intègre dans un alignement volcanique important, qui s'étend jusqu'au volcan sous-marin actif MacDonald, on peut par extrapolation considérer que le coude présent dans le sud de l'archipel tuvaluan traduit alors un changement de direction de la plaque. Ce changement, qui semble avoir un parallélisme de direction avec la partie crétacée de l'alignement hawaïen, pourrait être également estimé à 43 Ma (Guille G. *et al.*, 1993). Mais ceci est une pure spéculation de notre part.

Figure 28 : Localisation et âge des alignements volcaniques de type point chaud dans le Pacifique



d'après Duncan et Clague, 1985 ; Veevers, 2000

T.M. Brocher (1985) suggère, quant à lui, une origine structurale différente. En effet, pour cet auteur, les similitudes morphologiques existant entre les îles de Nukulaelae et de Wallis proviendraient d'une origine géologique commune. Ainsi, l'île la plus méridionale de l'archipel des Tuvalu ne serait plus Nukulaelae mais Wallis ! Cette île ainsi que le banc de Tuscarora, qui se situe à mi chemin entre Wallis et Nukulaelae, seraient issus d'un même point chaud ayant également créé l'archipel tuvaluan, même si « this tentative correlation has yet to be confirmed by geochemical analyses and radiometric dating of the Tuvalu, Nukulaelae, and Wallis islands ». Le volcanisme pléistocène analysé sur l'île de Wallis semble reposer sur un vieux bouclier tertiaire (Stearns 1945, *in* Brocher T.M., 1985). A l'inverse, Natland (1980 *in* Sinton J.M. *et al.*, 1985) pense que Wallis est un édifice à rattacher à l'histoire géologique des Samoa, alors que Sinton *et al.* (1985) estiment que les forages réalisés dans l'île ont livré des âges beaucoup trop récents (0,82 Ma – méthode K/Ar) pour être liés au volcanisme des Samoa ou à un quelconque modèle de point chaud. Des analyses sédimentaires ont permis de mettre en évidence une origine plus ancienne de l'île, au moins pliocène. Il y aurait donc eu plusieurs phases de volcanisme au cours du Quaternaire, qui auraient ainsi permis un dépôt constant ou non de matériaux sur un édifice plus ancien.

Comme nous venons de le voir, la grande complexité tectonique de la région et la modestie des connaissances géologiques sur l'archipel rendent l'origine obscure. Seules, des campagnes de forage comme celles réalisées par l'ODP¹⁶ permettraient de mieux connaître l'origine de cet alignement.

2.3. Pourquoi de tels alignements ?

Pour les géologues, à l'exception de G.A.J. Scott et G.M. Rotondo (1983), le stade de l'atoll s'inscrit dans un continuum (cf. Chapitre 2.1.2.) : une île haute sans récifs, comme Hawaï ou Mehetia, une île comme Oahu, avec un récif frangeant, Tahiti, avec un récif barrière, Maupiti, un presqu'atoll, et Midway, un atoll. Pour les géographes, ces stades sont individualisés puisqu'à chaque étape, que ce soit en domaine volcanique et/ou récifal, une nouvelle morphologie se dégage. Dans un gradient d'évolution et d'âge, nous passons successivement de l'île haute, avec un récif frangeant, à l'île haute, avec un récif barrière, au presqu'atoll, à l'atoll et enfin au guyot.

Cette évolution linéaire, que C. Darwin a expliquée dans son modèle (1842 *in* (Darwin C., 1962), se base exclusivement sur la subsidence de l'appareil volcanique initial qui est pour lui l'élément moteur de l'évolution morphologique des alignements océaniques dont il ignorait qu'ils étaient nés de point chaud. Elle peut avoir trois origines : tectonique, isostatique ou résulter de tassements de dépôts sous-marins profonds.

¹⁶ Ocean Drilling Program

2.3.1. Les fondements de la morphogenèse insulaire

Les premières hypothèses sur la formation de l'archipel des Maldives ont été émises au XIX^e siècle dans les travaux de Moresby (1835) et de Darwin (1842). Le premier forage réalisé au sein de l'atoll de Miladhunmadulu a pénétré la structure jusqu'à une profondeur de « *twenty to twenty-five fathoms* » et a mis en évidence un carottage « (...) *perfectly white, and like finely triturated coral-rock* » (Moresby, 1835).

C'est à partir d'observations préalables menées sur les cartes de l'Amirauté Britannique (Admiralty Survey, 1992a, c, b, d), que les deux scientifiques ont suggéré une origine issue d'une croissance continue de récifs coralliens depuis le sommet d'îles subsidées. Ainsi, la théorie d'évolution des complexes récifaux a été élaborée à partir d'observations menées sur les Maldives avant d'être exportée vers l'océan Pacifique central.

Ce sont les forages réalisés dans les archipels des Tuamotus (1840-1841) et des Tuvalu (1896-1898) qui vont être pris comme références pour la compréhension de l'histoire géologique des structures atolliennes en général. Le forage réalisé par Finckh au sein du lagon de l'atoll de Funafuti est le premier à avoir atteint des formations récifales vers 330-340 m de profondeur (Hinde G.J., 1904). Jusqu'alors, les forages mettaient en évidence du matériel sédimentaire composé de coraux, d'algues calcaires, de Foraminifères de faune récente jusqu'à 194 m (Guilcher A., 1950, 1954). Depuis, des chercheurs (Gaskell and Swallow, 1953, *in* McLean et Hosking, 1991) ont estimé que le socle volcanique devait se situer *a minima* sous 550 m de dépôts calcaires dans le cas de l'atoll de Funafuti et sous 770 m dans celui de l'atoll de Nukufetau. Ce sont des données de sismique réfraction qui ont permis de suggérer ces profondeurs. Au-dessous, les auteurs (Gaskell and Swallow, 1953 *in* Stoddart D.R., 1992) ont identifié trois couches de composition différente, qu'ils ont interprétées comme des dépôts consolidés de roches volcaniques, du fait d'une faible magnétisation, et cela jusqu'à 3 650 m. Au-dessous de cette profondeur, les auteurs ont suggéré, du fait de variation dans leurs mesures, la présence de roches éruptives solidifiées basiques.

La théorie de Darwin n'a pu être véritablement étayée que 110 ans après la tentative de Moresby et cela dans l'atoll d'Enewetak (1947, puis 1951-1952) où l'on a identifié des dépôts basaltiques à 1 267 m et 1 383 m de profondeur. A Mururoa, en 1964-1965, les forages ont permis de mettre en avant une épaisseur de dépôts calcaires recouvrant le basalte entre 415 et 438 m.

La disposition des structures insulaires dans les archipels reflète donc la géométrie sous-jacente des édifices volcaniques de type point chaud. Cette particularité accentue le caractère unique de chaque archipel. Les Maldives apparaissent alors comme une exception du fait de leur complexité structurale et de leurs caractéristiques morphologiques uniques. Elles comprennent trois principaux environnements sédimentaires qui sont : les récifs, les lagons situés entre 30 et 90 mètres de profondeur, et un plateau submergé localisé entre 350 et 550 m de profondeur.

En théorie, l'évolution morphologique d'une île haute volcanique vers un atoll corallien semble assez simple. Si cela est avéré en apparence pour l'archipel tuvaluan, qui revêt les formes classiques d'un archipel intra océanique né d'un point chaud, cela ne l'est plus lorsque l'on étudie l'archipel maldivien. La double chaîne insulaire, la multitude d'atolls au sein des atolls laissent envisager une autre origine, mais quelle peut-elle être ? On envisage alors une histoire géologique complexe avec une remise en cause du modèle darwinien à travers d'autres schémas, Darwin lui-même ayant émis des réserves quant à l'origine des Maldives. Lors d'une correspondance avec Moresby (*in* Woodroffe C.D., 1989), il considérerait que ces îles avaient pu se former par fragmentation d'une île plus vaste, similaire à la Nouvelle-Calédonie, soumise à la subsidence. Jusqu'à ce que les données de subsurfaces collectées au cours de la décennie 1970 confirment le modèle darwinien, les connaissances sur l'évolution géologique, stratigraphique et géomorphologique de l'archipel n'étaient que fragmentaires.

Ainsi, la structure sous-jacente des Maldives a fait l'objet de plusieurs explorations entre 1973 et 1978 : NMA-1, ARI-1, ODP Site 716 et ODP Site 715 (Droxler A.W. *et al.*, 1990 ; Purdy E.G. et Bertram G.T., 1992 ; Aubert O., 1994 ; Aubert O. et Droxler A.W., 1996 ; Belopolsky A.V., 2000).

Le premier forage, NMA-1, réalisé en 1976 dans le lagon de l'atoll de Malé nord, a pénétré plus de 2 106 m de dépôts successifs de carbonates tertiaires avant d'atteindre la couche basaltique à 2 222 m de profondeur ; une couche de 116 m de basaltes désagrégés a été ainsi identifiée. Il s'agit d'une des plus haute colonne de dépôts calcaires.

ARI-1 a été foré dans la mer intérieure et a permis de mettre en évidence une colonne sédimentaire allant du Pléistocène à la fin de l'Eocène sur plus de 3 315 m. A 3 365 m de profondeur, une mince couche d'environ 50 m de dépôts basaltiques altérés a été identifiée.

Le site ODP 716 a exploré le sous-sol, sous 533 m d'eau, entre l'atoll de Malé nord et l'atoll de Maalosmadulu sud, et a permis de mettre en évidence 260 m de dépôts sédimentaires continus (boue, craie, foraminifères) datant du Miocène supérieur au Pléistocène.

Le site ODP 715, situé au sud-est de l'atoll de Faadhippolhu a été daté à $57,2 \text{ Ma} \pm 1,8 \text{ Ma}$ (Aubert O. et Droxler A.W., 1996), ce qui est proche de la datation analysée pour le forage NMA-1 à 55 Ma. Les auteurs ont estimé que les limites dans les méthodes de datations pouvaient expliquer cette différence. La séquence des calcaires néritiques présents a été interprétée suivant trois unités, contenant un faciès de plage, un faciès d'arrière-récif et de récif, et a été datée de l'Eocène inférieur.

2.3.2. La vitesse de subsidence des archipels océaniques

D'après G. Ciarapica et L. Passer (1993), un récif a la capacité de produire des sédiments à une vitesse suffisamment élevée pour contrebalancer la subsidence tectonique de l'édifice et/ou

l'élévation du niveau de la mer. En effet, les valeurs de subsidence indiquées ci-dessous sont très largement moins importantes que la vitesse de croissance verticale corallienne estimée entre 7-8 mm/an. Toutefois, la vitesse de subsidence peut varier suivant les sites concernés et suivant le stade d'évolution dans lequel se situe l'île. Ainsi, la subsidence tectonique est d'autant plus importante que l'édifice est récent. Elle est attribuée au refroidissement et à la contraction de la plaque lithosphérique sur laquelle les rides se sont édifiées.

Certains auteurs estiment, à partir de moyennes globales, que la vitesse de subsidence est d'environ 0,2 mm/an pour une croûte jeune et de 0,05 mm/an pour une vieille croûte océanique. Pourtant, d'autres travaux ont révélé des vitesses beaucoup plus lentes pour des îles océaniques comme les archipels des Loyauté et des Tuamotus (Bourrouilh - Le Jan F.G., 1990) situés entre 0,008 mm/an et 0,052 mm/an et 0,04 mm/an pour la Réunion (Montaggioni L.F., 1978). D.R. Stoddart (1973) considère également une vitesse moyenne plus lente de subsidence située aux environs de 2,3 cm par siècle.

D'après R.S. Detrick *et al.* (1977), toute croûte océanique, comme la ride aséismique Laccadives-Maldives-Chagos, a subsidé d'environ 1 200 m durant les 15 Ma après sa formation. Pourtant R.C. Anderson (1998) estime que « *the volcanic basement on which the Maldivian atolls stand has subsided about 2000 m over 50 – 60 Ma (...) this gives an average subsidence rate of about 3 – 4 cm/ky –1, although peak rates may have been three times higher* ». Ces valeurs sont proches de celles calculées par A.W. Droxler *et al.* (1990) pour qui le taux de subsidence avoisinerait les 40 m/Ma ainsi que de celles de Ciarapica G. et Passeri L. (1993) qui proposent entre 70 et 30 m/Ma.

D'après des analyses plus fines, la vitesse moyenne de subsidence de l'archipel des Maldives varie de 0,043 mm/an (analyse des basaltes), à 0,047 mm/an (âge des sédiments carbonatés) selon A.V. Belopolsky (2000). Pour confirmer ces données, des analyses ont été également effectuées au nord de l'atoll de Minicoy, et ont révélé une vitesse de subsidence de 0,036 mm/an. Belopolsky A.V. (2000) considère, quant à lui, que l'archipel des Maldives est tectoniquement stable, de même, R.C. Anderson (1998) estime qu'il n'y a « *no evidence of significant additional subsidence or uplift during the last 21 000 years* ». Pour eux, la subsidence n'est plus mesurable jusqu'au stade ultime du modèle de type point chaud.

D'après J.C. Schofield (1977b), la subsidence des archipels des Tuvalu et des Kiribati a été beaucoup plus rapide que pour les archipels précédemment cités puisque l'auteur estime que, durant le Cénozoïque, elle était de 25 mm par siècle. Globalement, les atolls océaniques ayant un plancher d'âge crétacé ont une vitesse de subsidence thermotectonique qui ne peut pas être supérieure à 0,01 mm/an (Dickinson W.R. *et al.*, 1999).

La subsidence isostatique contribue d'une façon atténuée à la morphogénèse des atolls. Ainsi, les altitudes relatives des structures récifales interglaciaires donnent une indication sur les

mouvements verticaux de chaque île depuis cette période. Les forages réalisés dans les atolls d'Eniwetok, Bikini, Tarawa, Cocos et de Midway ont permis de mesurer la subsidence de ces édifices autour de 0,1 mm/an et de 0,024 mm/an (Grigg R.W. et Jones A.T., 1997). L'atoll de Mururoa, quant à lui, a une subsidence lente et régulière de l'ordre de 0,6 mm/an.

Du fait des chiffres exposés précédemment, on peut se demander pourquoi ces vitesses de subsidence laissent envisager que les archipels des Tuvalu et des Maldives sont des ensembles lithosphériques autonomes ?

2.3.3. Les autres théories

Le modèle de Darwin qui se base donc exclusivement sur la subsidence de l'appareil volcanique n'a pas contenté l'ensemble des chercheurs. En effet, certains, comme Daly (1910 *in* Guilcher A., 1988 ; Nunn P.D., 1994), ne se sont pas satisfaits de cette théorie et ont recherché l'influence d'agents environnementaux. Ainsi, pour cet auteur, il faut rechercher l'origine de ces formes (de l'île haute à l'atoll) dans les variations verticales du niveau marin. Sa théorie s'appuie sur la subégalité de profondeurs, environ 60 m, d'un grand nombre de lagons, bien que cette uniformité soit facilement contestable. Cela correspondrait à des plates-formes non coralliennes, recouvertes d'une fine couche de débris calcaires, aplanies durant une période glaciaire, notamment dans des régions où le refroidissement des eaux aurait empêché toute croissance corallienne. Durant la remontée postglaciaire, les colonies coralliennes, venant des mers chaudes, ont colonisé ces zones marginales. C'est cette particularité dans la distribution géographique des coraux durant la glaciation qui lui a permis d'expliquer les différences de taille entre les atolls et les récifs barrières. Les récifs nés durant cette phase de colonisation postglaciaire seront plus petits car plus jeunes. Pour étayer sa théorie, Daly a discuté les enseignements du forage de Funafuti, qui donnait pourtant raison à C. Darwin. En effet, pour lui, il n'y avait des coraux en position de croissance que jusqu'à - 60 m, le reste étant formé d'éboulis (du récif sur la pente externe). D'après la localisation du sondage, la morphologie du récif et la faible profondeur des forages, rien ne permettait de mettre en évidence le socle à seulement - 339 m, et rien ne permettait de considérer la théorie comme fausse. Les autres forages réalisés dans le lagon n'ont également pas permis de trancher le débat ; ils ont juste permis d'établir un dépôt de 43 m de calcaires divers sous 31 m d'eau.

Pourtant, les comptes rendus du rapport de forage de l'atoll de Funafuti mettent en cause les hypothèses développées par Daly. Selon Judd et Chapman (*in* Guilcher A., 1950), « on observe des coraux *in situ* jusqu'au fond du forage principal. Certains individus trouvés dans les parties profondes sont à la fois trop fragiles et trop bien conservés pour être des éboulis. Dans aucune partie du puits on n'a trouvé d'espèces d'eau profonde, ni une stratification d'éboulis, mais seulement des accumulations détritiques comme il y en a entre les coraux vivants. Des revêtements stalagmitiques dans des cavités indiquent des conditions de sursaturation telles qu'elles n'existent que dans des eaux très peu

profondes ; et la disposition du relief sur la pente externe n'est pas favorable, d'après Skeats (*in* Guilcher A., 1950) à l'hypothèse d'un édifice en encorbellement ».

Entre la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e, de nombreuses théories ont été proposées. Pour Murray et Wood-Jones, les récifs ont été formés (1) par croissance depuis des bancs sous-marins stables et sédimentés, ou (2) par poussée sur des fondations stables, les lagons étant excavés par dissolution marine en arrière du récif vivant d'après Murray et Gardiner. Pourtant, comme l'écrit Davis (1928, *in* Guilcher A., 1954) « la même action dissolvante devrait avoir empêché la croissance du banc vers le haut, par sédimentation sous-marine, avant qu'il atteignît une profondeur assez faible pour que les coraux puissent s'y établir ». Pour Semper et Guppy (3), les récifs croissent par poussée sur des fondations en voie de soulèvement, tandis que, pour Wharton (4), la croissance se fait sur des fondations stables totalement tronquées par l'abrasion ou (5) incomplètement tronquées par l'abrasion pour Tyerman, Bennet et Guppy ou (6) sur des plates-formes réalisées autour de fondations stables par érosion subaérienne ou sous-marine, comme le croyait Agassiz.

La morphologie plane de l'archipel des Maldives, avec un point coté du géoïde à -100 m environ, a suggéré à P.D. Nunn (1994) que les atolls n'avaient pas été formés par la théorie darwinienne, mais que c'est la seule croissance récifale qui a permis leur édification depuis un banc sous-marin.

Cependant, la théorie de subsidence exposée par C. Darwin reste l'explication la plus sérieuse pour analyser la forme et l'évolution des formes récifales sous-jacentes, bien que des exceptions soient inhérentes au modèle. Cette subsidence de l'édifice qui peut être continue ou intermittente va imposer une croissance récifale différente.

D'autres théories s'appuyant sur l'influence d'éléments extérieurs ont été développées et peuvent apporter des réponses pour certaines morphologies atolliennes comme pour les îles de Belize, de Makatea, de Nauru ainsi que certaines îles Salomon.

Si cette théorie ne remet pas en cause la condition *sine qua non* du modèle de Darwin, elle montre l'influence de paramètres environnementaux sur le modelé des formes, notamment par l'action des eaux météoriques durant les bas niveaux marins (Mcneil F.S., 1954 ; Purdy E.G., 1974 ; Bourrouilh - Le Jan F.G., 1990, 1992). De tels héritages karstiques subaériens ont été mis en évidence par J.E. Hoffmeister et H.S. Ladd (1944 ; 1945), puis ont été repris par d'autres auteurs. Ainsi, pour A. Guilcher (1950), « une couronne d'atoll préglaciaire ou interglaciaire a pu se fragmenter en compartiments par le biais de phénomènes érosifs et/ou de dissolution au cours d'un bas niveau marin. Durant la transgression suivante, l'édifice ainsi individualisé en différentes portions, permet l'édification d'un atoll indépendant ». Le même auteur envisage une origine exclusivement liée à un bas niveau marin au cours duquel « les récifs sont mis à nu et soumis à une érosion subaérienne marquée qui peut, après dissolution, mettre en place un système de dolines ».

E.G. Purdy (1974) envisage, quant à lui, une évolution des structures coralliennes comme étant dépendante des conditions environnementales subaériennes. Pour l'auteur, la forme générale d'un atoll ne résulte pas de la subsidence ou de la croissance corallienne mais est tout simplement l'héritage de la forme initiale du bassin qui a vu sa surface submergée puis érodée.

Des expériences menées en laboratoire ont permis de mettre en évidence que la karstification s'opérait sur une plate-forme initialement horizontale qui, soumise à un traitement acide, développait une forme particulière. En effet, la bordure discontinue de la plate-forme, entaillée par des échancrures, est saillante tandis que la partie centrale est encaissée. Ainsi, il a été considéré que les phases successives d'émersion ont pu largement affecter les plates-formes. « Une diagenèse différentielle est ainsi induite entre la périphérie des plates-formes et le centre » (Bourrouilh - Le Jan F.G., 1990). La périphérie est alors dégagée et peut recevoir les biocénoses coralliennes.

Ainsi, il n'existe pas une théorie unique concernant la morphogenèse des édifices mais des théories influencées par les variations environnementales qui conditionnent alors l'évolution d'un archipel.

Comme nous venons de le voir, la tectonique ou la subsidence ne peuvent expliquer seules les morphologies de certaines îles et/ou de certains archipels. Il faut dans certains cas envisager une histoire géologique complexe qui s'est déroulée sur le long terme.

2.4. L'évolution morphologique d'une plate-forme carbonatée : l'exemple des Maldives

L'évolution morphologique d'un archipel, et plus encore celui des Maldives, ne peut pas être uniquement liée à la relation entre la vitesse de sédimentation et la vitesse de subsidence, bien qu'il ait été démontré que la sédimentation a permis de contrebalancer les effets de la subsidence thermique, sur un intervalle de temps supérieur à 50 Ma. Il faut alors rechercher les causes dans les variations relatives du niveau de la mer qui ont été brutales et nombreuses dans ce secteur océanique.

L'archipel des Maldives constitue avec les Bahamas l'un des deux plus beaux exemples de plates-formes carbonatées. Si les Bahamas se sont développées le long d'une marge passive continentale de l'Atlantique ouest, l'archipel des Maldives correspond à la partie sommitale d'une plate-forme carbonatée qui se situe au-dessus d'une ride volcanique identifiée comme un segment de la trace du point chaud de la Réunion. Toutefois, lorsque l'on compare les Maldives avec d'autres plates-formes carbonatées intra-océaniques, développées à partir d'alignements de type point chaud, on peut être surpris par les dimensions uniques du système maldivien avec plus de 800 km de long, environ 130 km de large et une épaisseur de dépôts estimée entre 2 et 3 km. Cette plate-forme carbonatée contient en plus une sédimentation continue sur 50 Ma. Lorsque certaines rides aséismiques intra-

océaniques ont des dimensions comparables à celles des Maldives, comme la ride Ninetyeast ou Walvis, elles ne sont pas associées à une épaisse couche de dépôt carbonaté de petits fonds.

Si les facteurs tectoniques et biologiques ont largement influencé l'architecture de la ride des Maldives, les facteurs climatiques et eustatiques ont directement contrôlé l'évolution des dépôts de strates qui ont dicté les subdivisions sous-jacentes. Ainsi, l'évolution stratigraphique de l'archipel individualise trois stades (cf. Figure 29) qui correspondent aux périodes majeures d'accumulation (Aubert O., 1994) :

- le Paléogène : de 65 Ma à 23,5 Ma (Paléocène + Eocène + Oligocène) ;
- le Néogène : de 23,5 Ma à 1,8 Ma (Miocène + Pliocène) ;
- le Plio-Pléistocène : de 1,8 Ma à 11 000 BP (ou 10 300 BP).

2.4.1. Au Paléogène

Il s'agit d'un stade principalement sédimentaire (Aubert O. et Droxler A.W., 1992 ; Aubert O., 1994).

Le soubassement de la ride volcanique aséismique des Maldives s'est construit à la fin du Paléocène lors de la dérive, vers le nord, de la plaque indienne au-dessus du point chaud. Ce relief structural initial a permis de déterminer la taille, la forme et la localisation des environnements profonds ou de petits fonds qui se mettent en place de l'Eocène jusqu'à la fin de l'Oligocène.

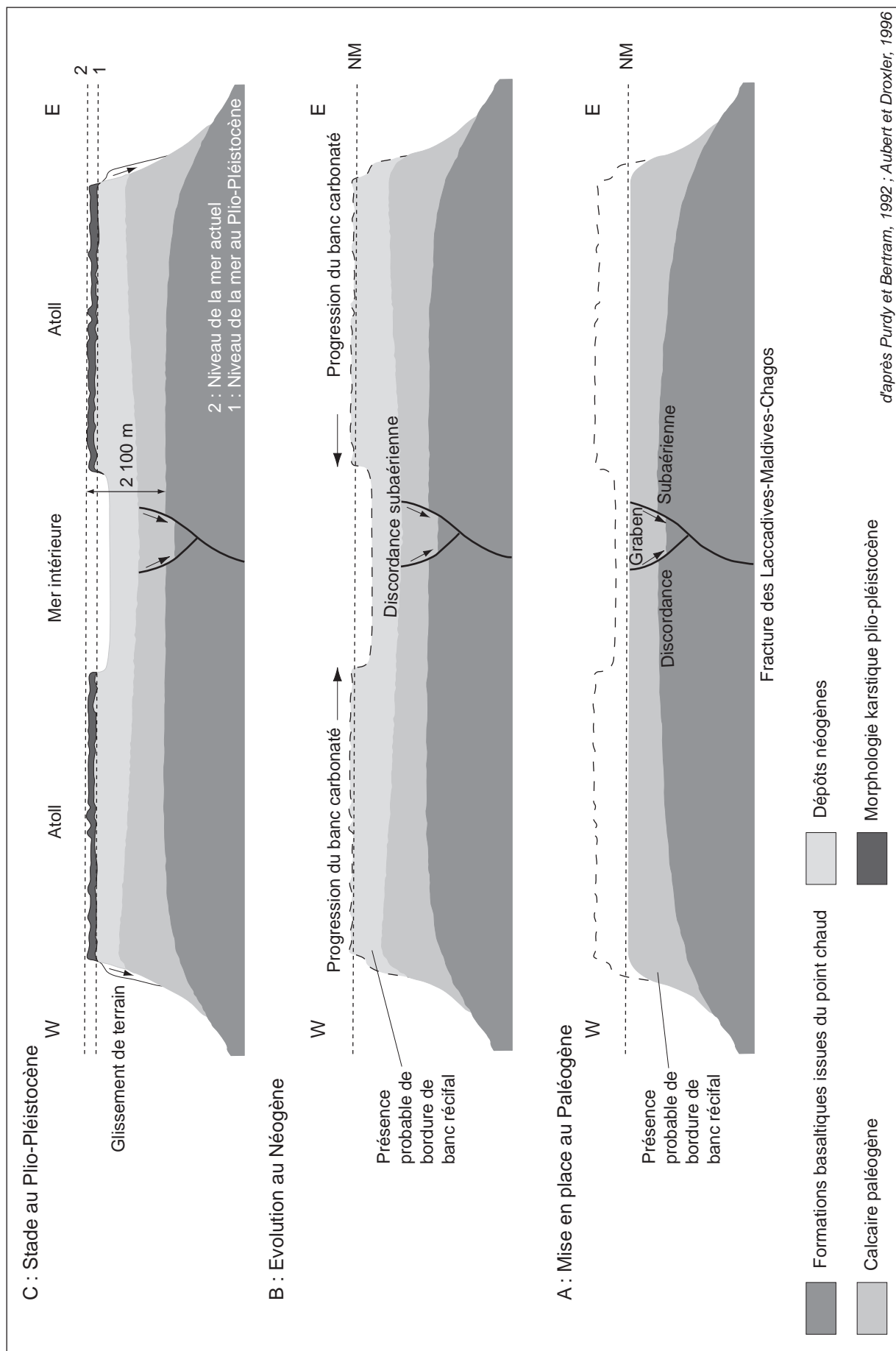
La présence de ce soubassement très plan nous laisse supposer que le système carbonaté s'est développé initialement sur un plateau volcanique et non sur une ride volcanique *stricto sensu*, comme à Hawaï ou en Polynésie française. En effet, la mise en place du système carbonaté a été initiée par la topographie volcanique sous-jacente, notamment à l'Eocène et au début de l'Oligocène. Il s'agit d'une étape tectoniquement importante. Des plates-formes carbonatées se sont formées au sommet du soubassement volcanique et ont été séparées par deux profonds et étroits grabens orientés NNE-SSW accidentant ainsi le plateau. En effet, à la fin de l'Oligocène, on assiste à un étirement crustal dû à la formation d'un dôme basaltique (Purdy E.G. et Bertram G.T., 1992), conduisant à la naissance d'un graben étroit.

A cette époque, les Maldives sont formées par des volcans localisés sur les deux bourrelets de la ride et par un graben central. D'après E.G. Purdy et G.T. Bertram (1992), les formations récifales se sont développées sur la périphérie des édifices volcaniques au cours de l'Eocène (moyen et supérieur), après l'ennoiment périphérique de la plate-forme carbonatée.

Entre l'Eocène supérieur et l'Oligocène, les plates-formes ont subi une sédimentation et une stratification en réponse à une élévation relative du niveau de la mer due à une subsidence tectonique.

Le jeu des failles encadrant les grabens s'est arrêté à la fin de l'Oligocène inférieur qui marque leur remblaiement par des matériaux issus non seulement de l'escarpement mais également de sédiments pélagiques.

Figure 29 : Evolution de l'archipel des Maldives du début de l'Eocène (Figure A) au Pléistocène (Figure C)



A l'Oligocène supérieur (vers 28,5 Ma), une importante variation négative du niveau de la mer a exposé les bancs carbonatés, expliquant la présence de certaines associations biologiques de petits fonds observées dans le forage ARI-I. Ce bas niveau pourrait être associé à celui identifié par Haq *et al.*, (1987), daté à 30 Ma, qui coïncide avec le début de l'accumulation des glaces de l'Antarctique.

La transition Oligocène-Miocène a été caractérisée par une transgression continue qui a eu comme répercussion un étagement des bancs carbonatés et l'enneigement partiel de leurs sommets. Elle a induit le creusement et un arrêt temporaire dans la sédimentation néritique. La reconstruction de la courbe relative du niveau de la mer entre l'Oligocène inférieur et le Miocène moyen montre une certaine similitude avec les données eustatiques enregistrées dans les « *deep water benthic foraminifera oxygen isotope values* » de J.C. Zachos (*in* Belopolsky A.V., 2000), envisageant non plus une variation eustatique locale mais générale.

2.4.2. Au Néogène

Durant ce stade d'évolution, ce sont les variations eustatiques qui ont joué un rôle majeur dans la physiographie de l'archipel et de ses plates-formes.

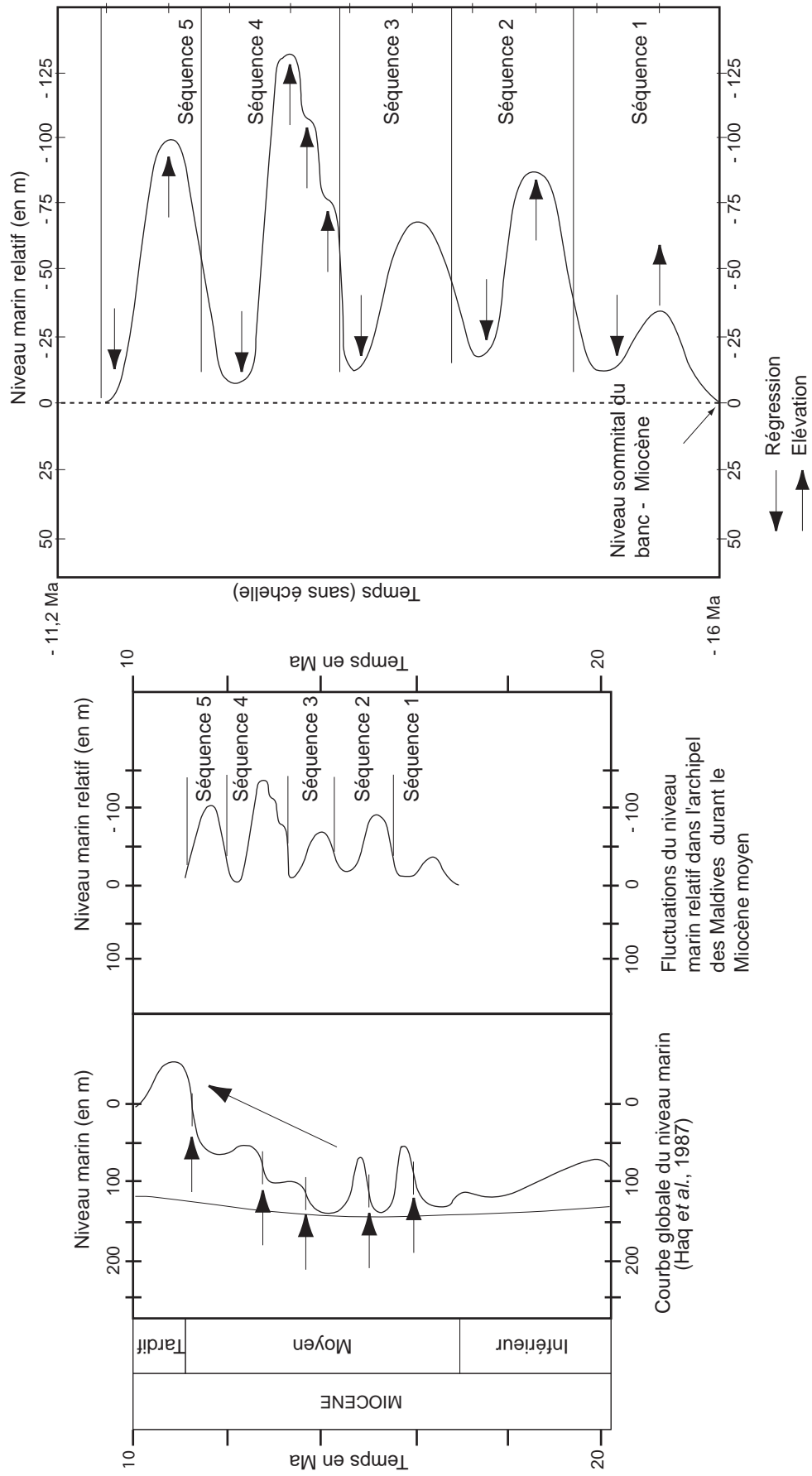
On assiste à la création d'un large bassin central, estimé à environ 30 km (Belopolsky A.V., 2000) partiellement ennoyé par les matériaux des bancs carbonatés issus du Miocène inférieur. Des faciès pélagiques remplissent complètement la dépression interne et génèrent une nouvelle morphologie : la mer interne ou paléo-mer intérieure. On assiste au développement massif de coraux Scléractiniaires ainsi qu'à la formation de l'ossature du récif proche de la bordure actuelle. Il s'agit de la mise en place des Proto-Maldives (Aubert O., 1994).

Si le niveau de la mer expose de nouveau les bancs carbonatés à l'air libre au début du Miocène moyen, cette période est surtout marquée par une importante progradation des marges des bancs sur des distances estimées par A.V. Belopolsky (2000) entre 10 et 15 km. Cette progradation a été conduite par des cycles eustatiques complets, estimés au nombre de cinq, chaque séquence représentant un cycle de baisse et d'élévation du niveau de la mer (cf. Figure 30).

Il a été estimé qu'entre la fin du Miocène et le début du Pliocène, une importante transgression est responsable de la submersion des sommets des bancs carbonatés qui étaient en voie de progradation. Ce développement systématique des marges du banc en direction du centre du bassin peut être interprété comme l'aboutissement d'une régression sur le long terme.

Elle va d'ailleurs permettre d'achever la phase de progradation. Tandis que les marges carbonatées ont progradé vers le centre du bassin durant la fin du Miocène et le début du Pliocène, plusieurs zones néritiques ont été successivement submergées, entraînant la création de chenaux disséquant les bancs carbonatés. La relation causale entre les chenaux et les événements de submersion reste obscure, du fait d'un manque de données sismiques et sédimentologiques de la zone inter-atoll.

Figure 30 : Reconstitution des courbes d'évolution du niveau marin durant le Miocène, dans l'océan Mondial et dans l'archipel des Maldives



Cette reconstruction de l'histoire géologique et eustatique de l'archipel, à la fin de l'Oligocène et au milieu du Miocène, est conforme au forage et est cohérente avec les accumulations géométriques de la plate-forme carbonatée est couverte par des sédiments composés principalement de nannoplancton carbonaté, de boue à foraminifères ainsi que de sable bioclastique issu des bordures de l'atoll.

2.4.3. Au Plio-Pléistocène

Ce stade s'est accompagné d'une phase de variation négative du niveau marin que les auteurs (Droxler A.W. *et al.*, 1990 ; Ciarapica G. et Passeri L., 1993 ; Belopolsky A.V., 2000) ont considérée comme plus importante que la régression würmienne. Comme lors des précédentes phases régressives, les atolls ont été érodés et karstifiés. D'après G. Ciarapica et L. Passeri (1993), ces effets régressifs ont des conséquences directes sur les vitesses de sédimentation. En effet, les analyses tirées du forage ODP 716 ont révélé que la vitesse de sédimentation était de 56 m/Ma du Miocène supérieur au Pliocène inférieur, de 22 m/Ma du Pliocène supérieur au Pléistocène inférieur et de 38 m/Ma au cours du Pléistocène.

La charnière Pliocène-Pléistocène est caractérisée par une sédimentation importante et par l'évolution terminale de la morphologie d'un banc en un atoll. Les expositions permanentes des bancs dues aux fluctuations eustatiques de haute fréquence et haute amplitude ont rehaussé la topographie karstique, qui sera utilisée ultérieurement comme substratum pour le développement de « patates » de corail durant la remontée du niveau de la mer. De plus, la dissection des chenaux se poursuivra et permettra de mettre en place des atolls modernes. Cette exposition explique également la présence actuelle de nombreux faros dans les atolls.

Les travaux menés jusqu'à présent ont toujours montré que le développement optimal d'une plate-forme carbonatée était intimement lié aux variations verticales du niveau de la mer. Les études réalisées dans l'archipel des Maldives (Droxler A.W. *et al.*, 1990 ; Aubert O. et Droxler A.W., 1992 ; Purdy E.G. et Bertram G.T., 1992 ; Ciarapica G. et Passeri L., 1993 ; Aubert O., 1994 ; Aubert O. et Droxler A.W., 1996 ; Belopolsky A.V., 2000 ; Belopolsky A.V. et Droxler A.W., 2002) prouvent que les carbonates modernes et fossiles sont mobiles non seulement verticalement mais également latéralement.

Si comme nous venons de le voir, les variations morphologiques à l'échelle d'un archipel dépendent des conditions tectoniques, biologiques, eustatiques, à des échelles de temps et d'observation qui sont celles du géologue, les morphologies superficielles traduisent une évolution récente quaternaire.

Chapitre 3 – Le rôle des variations eustatiques dans l'évolution des archipels

L'impact des variations du niveau de la mer et des changements de l'environnement sur le développement des systèmes coralliens ne peut être appréhendé qu'au travers de l'étude d'événements climatiques anciens qui ont eu des conséquences plus marquées sur la composition, la structure, le volume et la morphologie des constructions récifales.

3.1. Généralités sur les variations du niveau de la mer

Les variations eustatiques ont été caractérisées au cours des deux derniers millions d'années par une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires suivant une périodicité d'environ 100 000 ans (Cabioch G., 1988 ; Pirazzoli P.A., 1996) et une amplitude d'environ 150 m (Genthon P. *et al.*, 2001).

Les variations du niveau marin sont dépendantes de facteurs globaux et locaux comme les changements verticaux du niveau océanique, les changements verticaux du niveau terrestre, la déformation du géoïde, la tectonique des plaques, le re-modelage de la morphologie côtière ainsi que les changements dans les interactions terre-mer.

La quantité d'eau présente sur les continents varie suivant les cycles glaciaires et interglaciaires qui entraînent des variations globales de la quantité d'eaux marines contenue dans les bassins océaniques. C'est une composante essentielle de l'évolution des niveaux marins que l'on peut relier à un niveau absolu qui doit épouser, en théorie, la surface du géoïde. Les observations géophysiques et les données satellitaires actuelles montrent que (Mörner N-A., 2000) :

- la hauteur du niveau marin par rapport au géoïde n'a pas toujours été identique ;
- les mouvements inhérents aux fonds marins et aux blocs continentaux entraînent des différences dans le niveau marin local ;
- les mouvements des grands courants géostrophiques permettent les déplacements de masses d'eau considérables qui font que la surface de l'océan n'est pas horizontale.

Le niveau général des océans et des mers coïncide avec le géoïde. Le géoïde est une surface équipotentielle du champ de gravité terrestre qui permet de visualiser les variations géographiques de la gravité terrestre. En milieu océanique, le géoïde correspond exactement au niveau qu'aurait la surface de la mer si elle n'était soumise à aucune autre force que la gravité terrestre. Les caractéristiques du géoïde évoluent à travers les siècles puisque, d'après N-A. Mörner (2004), au cours du Dernier Maximum Glaciaire, il apparaît comme ayant été plus important. Les ondulations du

géoïde sont les répliques du fond des océans. Du grec *gê*, terre et *eidos*, aspect, le géoïde traduit les formes du relief terrestre et est caractérisé par des creux, qui indiquent des déficits de matières, et des bosses, qui sont des excès de matière, pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de dénivellation (Pirazzoli, 1996). Aux Maldives, par exemple, la surface de la terre est inférieure de 100 m à la surface de référence et, il s'agit du point le plus bas du géoïde océanique. A l'inverse, dans l'archipel des Tuvalu, la surface est surélevée de plus de 30 m (cf. Figure 31).

En plus des anomalies topographiques au niveau des océans, des effets stériques liées aux conditions climatiques régionales comme la température ou la salinité, peuvent influencer localement les variations du niveau de la mer. Ainsi, d'après R. Paskoff (2001) une augmentation de 1°C de la température de l'eau sur une couche océanique de 200 m relèverait le niveau marin d'environ 20 cm.

3.2. Evidences de morphologies nées de paléo-niveaux marins

Les récifs coralliens sont donc dépendants des variations du niveau de la mer. Ils oscillent avec elle et peuvent, lors de ses variations, négatives ou positives, édifier des morphologies particulières qui nous serviront de témoins eustatiques. Ainsi, l'abaissement asymptotique du niveau marin depuis l'Optimum Climatique a laissé des traces sur les platiers récifaux de nos archipels. Les analyses des séquences récifales holocènes nous ont également permis de restituer les variations relatives du niveau marin, notamment par la présence d'associations biologiques clés, suivant des gradients de profondeur, comme ce qui a pu être fait dans d'autres secteurs récifaux (Cabioch G. *in* <http://www.ird.nc/dme>) :

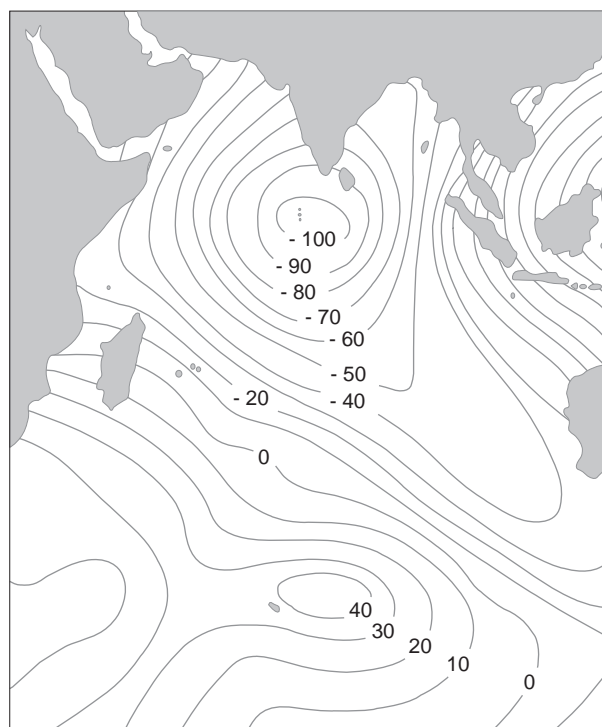
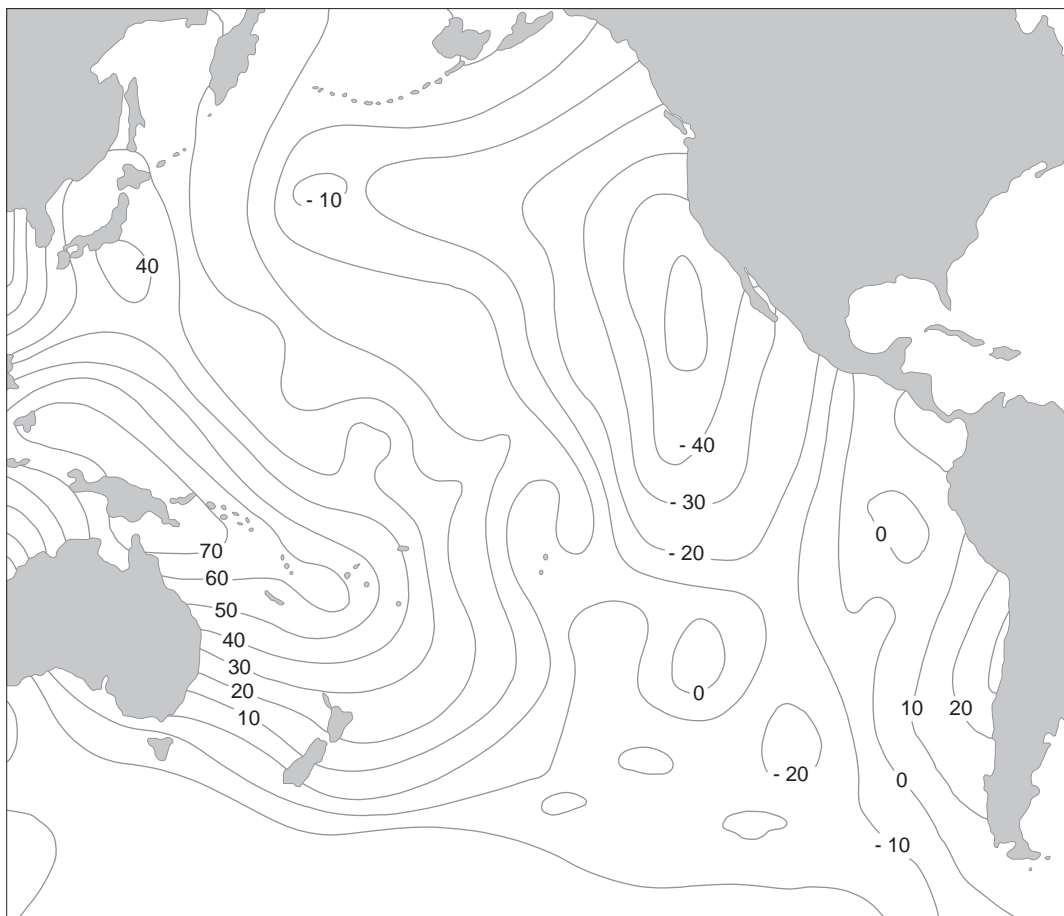
- *Dendropoma maximus*, *Porolithon onkodes*, *Acropora danai*, *A. robusta*, *A. humilis*, *Pocillopora verrucosa*, sont caractéristiques des milieux externes entre 0 et 6 m de profondeur ;

- *Acropora clathrata*, *A. hyacinthus*, *A. cytherea* et *tenerea* marquent des zones plus profondes, entre 10 et 15 m.

En plus des données paléobathymétriques, on peut également envisager de travailler sur les datations d'échantillons collectés *in situ*, effectuer des analyses géochimiques à partir de carottages...

Si l'étude des variations eustatiques quaternaires dans leurs impacts sur la structuration des récifs coralliens n'est pas un sujet inédit, les recherches actuelles tendent à mieux les comprendre, à mieux les interpréter, à mieux les intégrer dans une évolution globale, passée et future. Il faut toutefois rester prudent quant à l'utilisation des récifs coralliens et des formes qui leur sont associées comme des témoins irréprochables des variations passées. Ils peuvent néanmoins aider à la compréhension, dans un travail qui se veut naturaliste. La multiplicité d'exemples concordants sur différents territoires insulaires peut laisser présager une évolution et une interprétation locale, voire générale, des variations eustatiques.

Figure 31 : Morphologie du géoïde dans les océans Pacifique et Indien
(d'après P.D. Nunn, 1994)



Le récif possède des formes externes et des assemblages de faciès internes caractéristiques qui peuvent être utiles, soit pour interpréter l'évolution d'un récif en fonction des variations du niveau de la mer, soit pour déterminer les variations du niveau de la mer d'après la succession verticale de faciès.

3.2.1. Les témoins érosifs

Les différentes observations faites dans les structures récifales de l'archipel maldivien nous ont permis de dégager des morphologies émergées ou sous-marines particulières qu'il convient d'expliquer.

Il nous est apparu comme évident que l'épisode de blanchiment de 1998 a permis de dégager la structure sous-jacente à la croissance corallienne holocène. Cette croissance qui paraissait importante, notamment à l'intérieur de certains lagons, semble avoir été faible sur la surface supérieure des thilas. D'après Purdy E.G. et Bertram G.T. (1992), le taux de sédimentation dans l'archipel des Maldives n'a pas été si important, ce qui nous laisse supposer des crises de mortalité récente et répétée des organismes coralliens sur les derniers 4 000-3 000 BP.

3.2.1.1. Les encoches littorales : des formes régressives ?

Elles sont considérées, sur les côtes des littoraux calcaires, comme les indicateurs les plus fiables pour identifier d'anciens niveaux marins, lorsque ces derniers ont eu une stabilité assez longue pour éroder la pente externe.

Les premiers plongeurs qui ont exploré les fonds sous marins des Maldives, durant la période 1950-1970, avant l'instauration par le gouvernement d'une limite maximale de plongée à - 40 m, ont été surpris par la présence et la multiplicité de larges encoches, ainsi que des terrasses submergées jusqu'à des profondeurs de 55-65 m¹⁷.

Hass (1961 *in* Stoddart D.R., 1966) est un des premiers à avoir associé ces formes à un bas niveau marin et cela jusqu'à une profondeur de 135 m.

Généralement considérées comme des formes nées durant des phases régressives du niveau marin, les encoches identifiées au cours de nos plongées semblent être associées à la remontée postglaciaire. Ce sont les témoins des ralentissements des paléo-niveaux marins durant les périodes d'élévation (Laborel J. *et al.*, 1999).

¹⁷ Entretiens avec H. Maniku et T. Blachère

Au cours de nos plongées, dans des escarpements verticaux comme les pentes externes atolliennes, il a été souvent difficile de faire une différence entre une encoche, une grotte ouverte modifiée par l'action des vagues et une grotte ouverte non modifiée, même si elles impliquent respectivement des variations du niveau marin pour les premières, et des phénomènes de karstification ou de soutirage pour les secondes. Ces formes héritées, nées par érosion mécanique et chimique de la roche en place, impliquent également un processus de karstification par les eaux météoriques avoisinantes. Elles sont alors remaniées et peuvent être difficiles à individualiser notamment vis-à-vis de formes nées uniquement lors de phase de submersion. Ainsi, les encoches se creusent durant plusieurs phases de karstification mais elles ne sont pas des formes karstiques. Elles correspondent à un niveau marin stationnaire pendant une période donnée et marque donc un niveau basal du karst (Genthon P. *et al.*, 2001).

Qu'elles soient purement karstiques ou karstico-eustatiques, elles sont plus visibles lorsque les organismes constructeurs ne les ont pas totalement recouvertes.

Lors de nos différentes plongées nous avons pu identifier sur l'ensemble des sites deux très belles encoches situées respectivement à - 24/- 26 m (cf. Figure 32) et - 32/- 35 m de profondeur qui correspondent à celles retrouvées dans différents parties du monde (Bianchi C.N. *et al.*, 1997 ; Collina-Girard J., 1998, 1999, 2000 ; Laborel J. *et al.*, 1999). Nous avons pu identifier sur plusieurs sites d'autres encoches localisées vers - 5/- 7 m de profondeur, vers - 35/- 40 m ainsi que vers - 55/- 60 m. Malheureusement, ce repérage n'a pas été fait sur l'ensemble de nos sites de plongée pour deux raisons principales : dans les eaux peu profondes, les grottes et/ou les encoches sont dissimulées sous la croissance corallienne holocène, et la limitation officielle de la plongée à - 40 m ne nous a pas permis d'identifier pour chaque site la présence ou non de l'encoche située vers - 55 m \pm 5m.

Nous admettons une marge d'erreur de \pm 1 m quant à la profondeur exacte des encoches répertoriées, liée à la fois au marnage lors du début de la plongée et à l'imprécision de l'appareil de mesure.

Nous devons faire mention dans cette section que nous n'avons pas souhaité analyser les plates-formes récifales qui sont difficiles à identifier et sont souvent mal définies. En effet, il est souvent laborieux de déterminer l'âge de ces dernières : s'agit-il de formes pléistocènes ou holocènes ?

Occurrence des encoches identifiées lors de nos plongées :

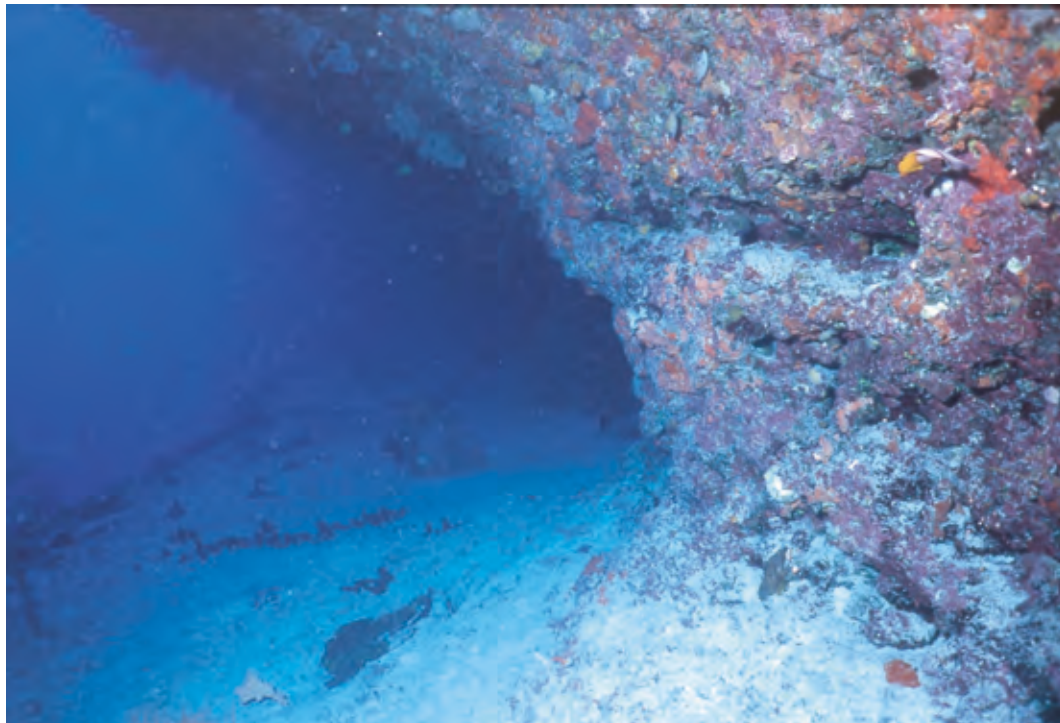
-5/-7 m : Banana Reef (K), Malé (K), Maamunagau (R) ;

-18/-19 m : Malé (K), Kiki reef (K) (cf. Figure 33);

-24/-26 m : Hulhudhoo (B), Dhigu faru (B), Hulhudhoo (R), Banana reef (K), Gan 1 (S), Malé (K), Embudhoo (K), Gan 2 (S) ;

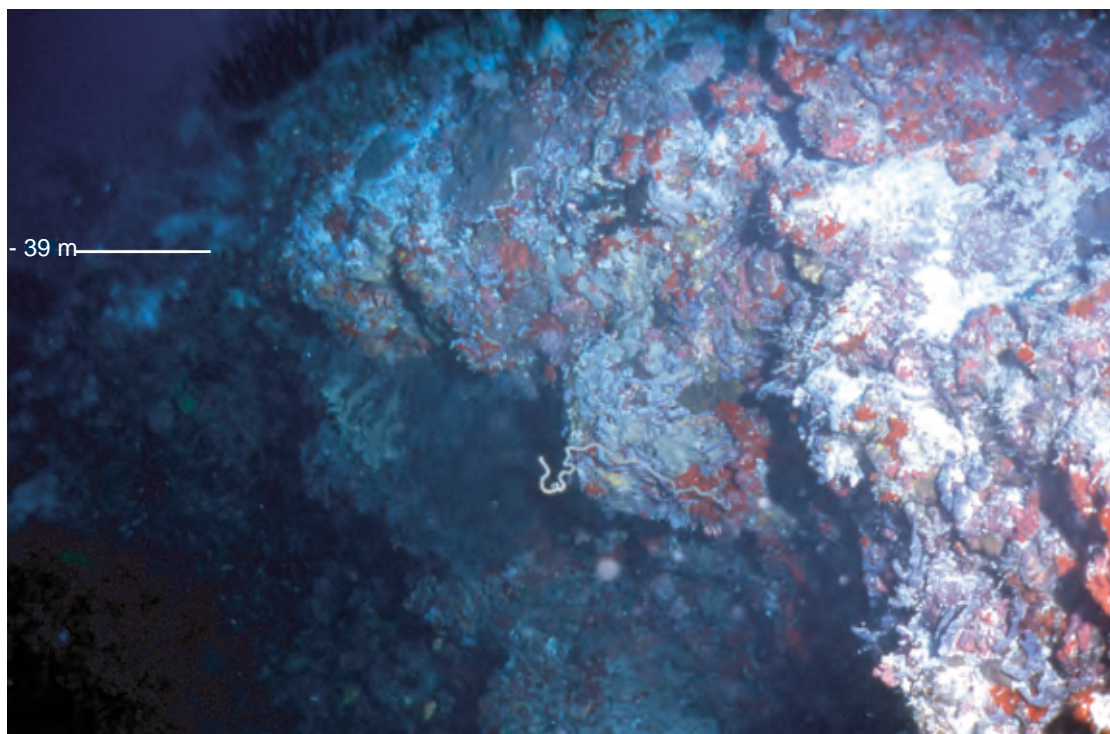
Figure 32 : Témoins de paléoniveaux marins

Passage entre la grotte et l'encoche à -27 m (atoll d'Addu)



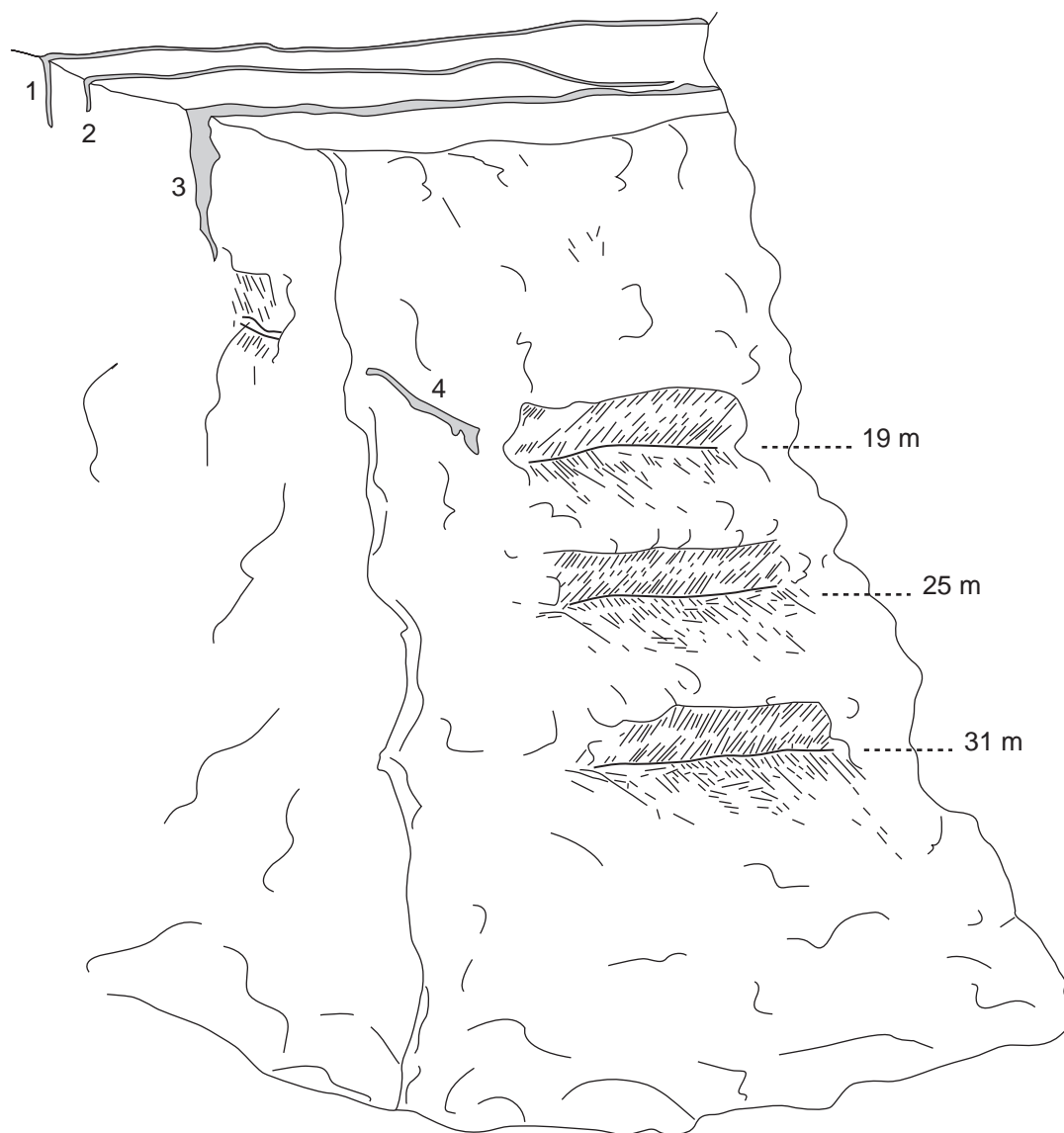
(Cliché J. Laborel)

Pente externe, surplomb d'une encoche (atoll de Goidhoo, passe NW)



(Cliché J. Laborel)

Figure 33 : Exemples de fissures superficielles et de paléoniveaux marins dans le récif NE de Malé



d'après *Engineering Geology LTD et Tropical coastal management*, 1987

-32/-35m : Maamunagau (R), Goidhoo (H), Banana reef (K), Galhu falhu (K), Gan 1 (S), Malé (K), Kiki reef (K), Embudhoo (K), Gan 2 (S) ; (cf. Figure 34)

-35/-40 m : Banana reef (K), Malé (K), Maamunagau (R) ; (cf. Figure 35)

-55/-60 m : Embudhoo (K), Maamunagau (R), Rasfari (K), Gan (S).

Ces encoches fraîches impliquant une immersion assez rapide coïncident en tout point aux replats d'érosion repérés sur plusieurs sites mondiaux (cf. Tableau sur la répartition des encoches mondiales – Annexe), en France, en Méditerranée, ou, par exemple, à Marie Galante (Collina-Girard J., 2000) où la séquence de lagons noyés, qui n'ont pas été décalés par la néotectonique de la fin du Quaternaire, est un argument pour leur caractère récent.

En théorie, dans les océans à faible marnage et à températures élevées, comme aux Tuvalu et aux Maldives, on peut observer des encoches dans une position médio-littorale à supra-littorale (Pirazzoli P.A., 1986). Suivant la durée du stationnement du niveau marin, la paroi sera plus ou moins entaillée, laissant place à une encoche profonde de plusieurs mètres de profondeur, ou à une simple échancrure de quelques centimètres (cf. Figure 36 - annexe). Si les encoches supra-littorales se situent dans les zones d'aspersion des embruns, elles peuvent individualiser des formes caractéristiques comme les structures en nids d'abeilles, le recouvrement par des éléments récifaux empêche d'identifier nettement ces formes (cf. Figure 37 - annexe). Les encoches rencontrées lors de nos plongées sont donc toutes des encoches de type médio-littoral.

La forme de l'encoche varie suivant sa localisation géographique. Elle est généralement continue et profonde dans les mers chaudes intertropicales du fait du faible marnage, de la verticalité de la pente externe et de la température de l'eau qui est favorable aux actions bio-chimiques et physico-chimiques.

Ainsi, la faiblesse des marnages concentre la corrosion sur une marge verticale étroite en amplifiant ainsi l'efficacité (Dalongeville, 1988) dans les zones d'aspersion des embruns, tandis que la pente influence l'étagement en limitant l'extension des formes (Pirazzoli P.A., 1986). Ainsi, pour une côte abritée où le marnage est d'un mètre, la vitesse de corrosion est estimée à 1 mm/an au niveau du niveau moyen de la mer (Pirazzoli P.A., 1986). Fletcher (1995) estime, quant à lui, que pour une stabilité du niveau marin de stationnement holocène d'environ 2 000 ans, la vitesse moyenne d'érosion est de 1,28 mm/an. Les vitesses d'érosion calculées sur des encoches de 2 à 3 m de profondeur dans l'atoll d'Aldabra suggèrent qu'elles ont été formées en 2 000 ou 3 000 ans (Torunski, 1979 *in* Trenhaile A.S., 1987). Ainsi, pour la côte abritée de l'île de Malé (cf. Figure 38 - annexe), où le vertex est situé à la hauteur du niveau moyen de la mer, les encoches « corrosives » de 3 m de profondeur auraient donc bénéficié *a minima* de 3 000 ans de stabilité. Si l'on envisage de telles vitesses d'érosion, les marqueurs identifiés à plusieurs niveaux le long de la pente externe des récifs ne peuvent être holocènes.

Figure 34 : Exemples de profils sous-marins dans l'atoll de Maalhosmadulu sud

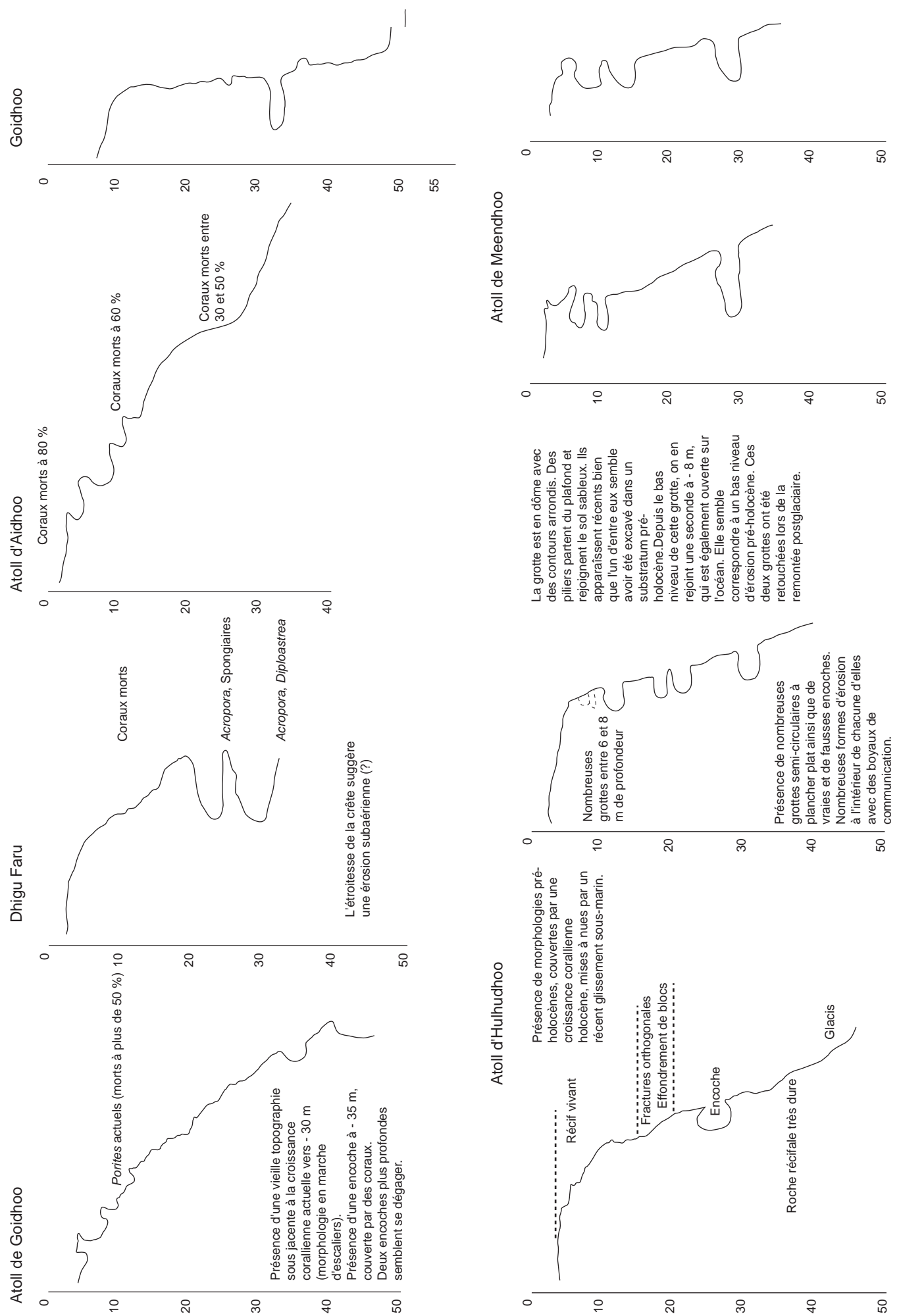
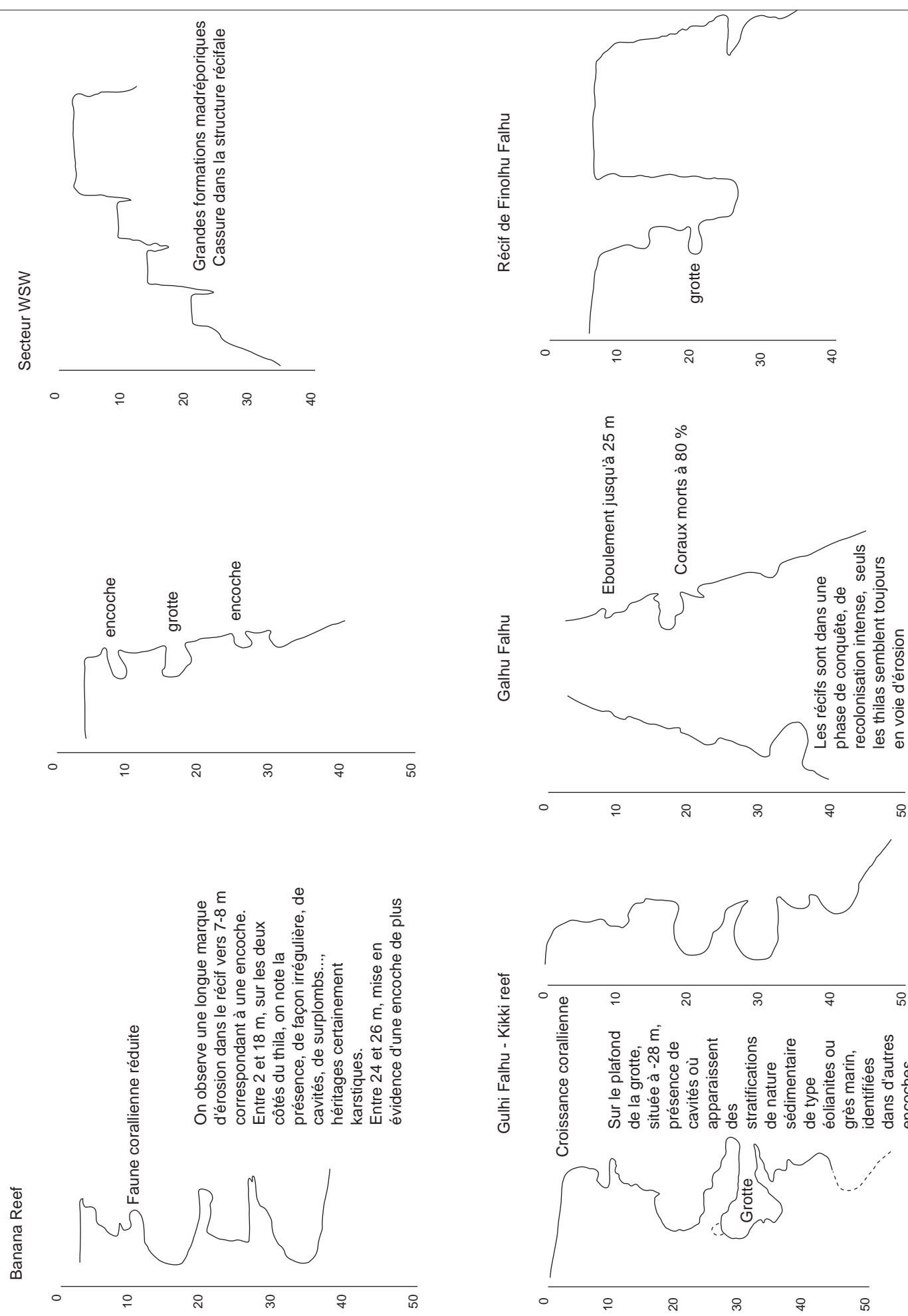


Figure 35 : Exemples de profils sous-marins dans l'atoll de Kaafu



Cependant si certaines encoches ont été façonnées antérieurement à cette période, cela ne constitue pas un donnée générale. Ainsi, il faut peut être considérer que la vitesse d'érosion élaborant les encoches dans les calcaires récifaux est plus rapide que ce qui est couramment admis.

Une encoche de corrosion est particulièrement bien développée à proximité du niveau moyen de la mer, lorsque le site est en position d'abri. Elle n'a pas une forme nette mais est plutôt déchiquetée par les corrodeurs agissant sur la roche calcaire. Dans l'atoll d'Aldabra, les auteurs ont démontré que les formes étaient, par contre, particulièrement bien développées sur les côtes exposées aux alizés. En effet, « a survey of erosion rates around the atoll tended to confirm the idea that erosion increased directly with increasing exposure to dominant winds » (Trudgill S. T., 1976).

L'encoche traduit donc une érosion localisée à différents niveaux suivant divers processus (physique, chimique, biologique, mécanique). Certaines sont directement liées au phénomène de corrosion (Guilcher A. et Pont P., 1957) qui est important dans la zone de balancement des marées et d'aspersion des embruns.

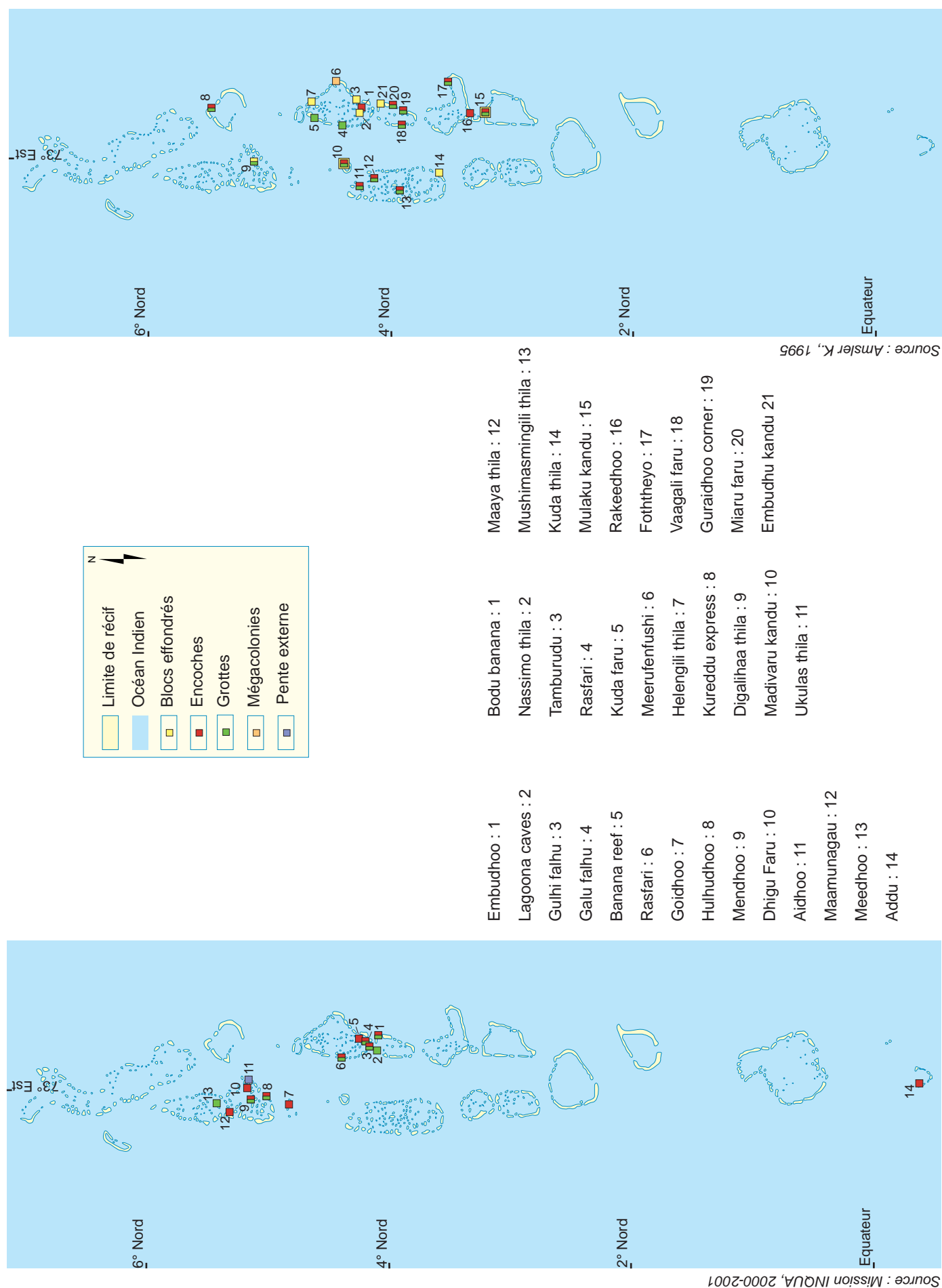
Tableau 2 : Exemple de vitesse d'érosion (*in* Pirazzoli P.A., 1986) :

Localisation	Lithologie	Morphologie	Vitesse d'érosion (mm/an)
Oman	calcaire	encoche	2,5
Porto Rico	éolianite	encoche	0,6-1,6
Barbade	calcaire	encoche	0,2-2
Aldabra	calcaire	encoche	0,6-1
Rurutu	calcaire	encoche	1-1,6

Les variations eustatiques provoquent parfois un enchevêtrement de formes actives et de formes héritées qui modifient le profil de l'encoche, qui peut être alors double ou triple, et se trouver ainsi à des niveaux différents (Pirazzoli P.A., 1986).

Durant ces phases d'émersion, des rivages ont été créés puis façonnés par les agents extérieurs. Si ces paléorivages ou paléomorphologies sont très difficiles à individualiser, nous avons suggéré leur présence notamment dans les atolls de Maalosmadulu nord et sud (cf. Figure 39). En effet, la zone de haut fond localisée dans la partie centre-est de l'atoll de Maalosmadulu nord semble individualiser un ancien rivage dissimulé sous des tonnes de sédiments. Les plongées que nous avons effectuées sur cette zone ne nous ont pas permis d'observer des morphologies particulières laissant supposer un ancien rivage. Toutefois, notre collègue William Allison a identifié sur la bordure externe de l'île de Maamunagau à environ 35 m de profondeur des grottes et des encoches. Il pourrait s'agir du trait de côte d'une ancienne île ou alors une vaste zone de thilas reliés entre eux par des accumulations sableuses de type tombolo ou dunes hydrauliques.

Figure 39 : Typologie et localisation des morphologies sous-marines, archipel des Maldives



Au delà de la découverte de niveaux marins successifs, l'analyse du plafond de toutes les encoches que nous avons observées nous a suggéré une remontée très rapide, après les stationnements. En effet, aucune d'entre elles ne semble avoir été modifiée lors de la remontée (cf. Figures 40 et 41).

3.2.1.2. Les formes karstiques

L'impact des eaux météoriques sur une structure atollienne, lors d'un bas niveau marin pléistocène, n'est pas une hypothèse nouvelle (Mcneil F.S., 1954 ; Purdy E.G., 1974 ; Bourrouilh - Le Jan F.G., 1990 ; Purdy E.G. et Bertram G.T., 1992). Les forages profonds réalisés dans les différents atolls et analysés précédemment ont permis de mettre en avant le caractère très vacuolaire des structures (Guille G. *et al.*, 1993 ; Buigues D., 1996), résultant à la fois du mode de construction des récifs, des conditions extérieures fragilisant l'édifice, et de l'évolution karstique due aux niveaux marins régressifs, qui a pu élargir les vides. Ainsi, la perméabilité des calcaires coralliens émergés étant à l'origine très élevée (Salomon J.- N., 2001) l'est d'autant plus quand les roches carbonatées ont été soumises à plusieurs phases de dissolution.

L'apparition du modelé karstique se fait par l'action conjointe de phénomènes de cimentation et de dissolution biochimiques (Bourrouilh - Le Jan F.G., 1992) et évolue soit par dissolution soit par effondrement de la partie supérieure des morphologies élaborées.

D'après les observations effectuées durant nos plongées, les morphologies sont constituées d'une pellicule mince de sédiments actuels et de coraux vivants en surface qui recouvrent une paléomorphologie karstique, difficile à identifier, provenant des émergences multiples subies par les édifices récifaux depuis 2 Ma (Purdy E.G., 1974), et plus si l'on considère l'histoire géologique des Maldives depuis leur formation. Cette remarque formulée par E.G. Purdy (1974) concerne également les environnements à sédimentation carbonatée intense.

Durant le Dernier Maximum Glaciaire, les vieux récifs maldiviens ont été particulièrement karstifiés. On peut considérer que leur érosion a dû être d'autant plus importante que les eaux de pluie ont traversé une couche de sol humifère. En effet, ces derniers devaient alors former dans le paysage de l'océan Indien une vaste surface insulaire probablement recouverte de forêts et traversée par des systèmes fluviaux majeurs dont certaines passes actuelles doivent être les témoins, comme celle de *Kudarikilu kandu*. Ce chenal scindant l'atoll de Maalosmadulu sud en deux atolls distincts semble correspondre au passage d'une ancienne rivière désormais recouvert par des dizaines de mètres de sédiments. Sa profondeur réduite par rapport aux autres chenaux et l'abondance des farus dans ce secteur de l'archipel nous ont permis de supposer une origine différente.

Figure 40 : Hypothèses d'évolution pour les mégastructures atolliennes

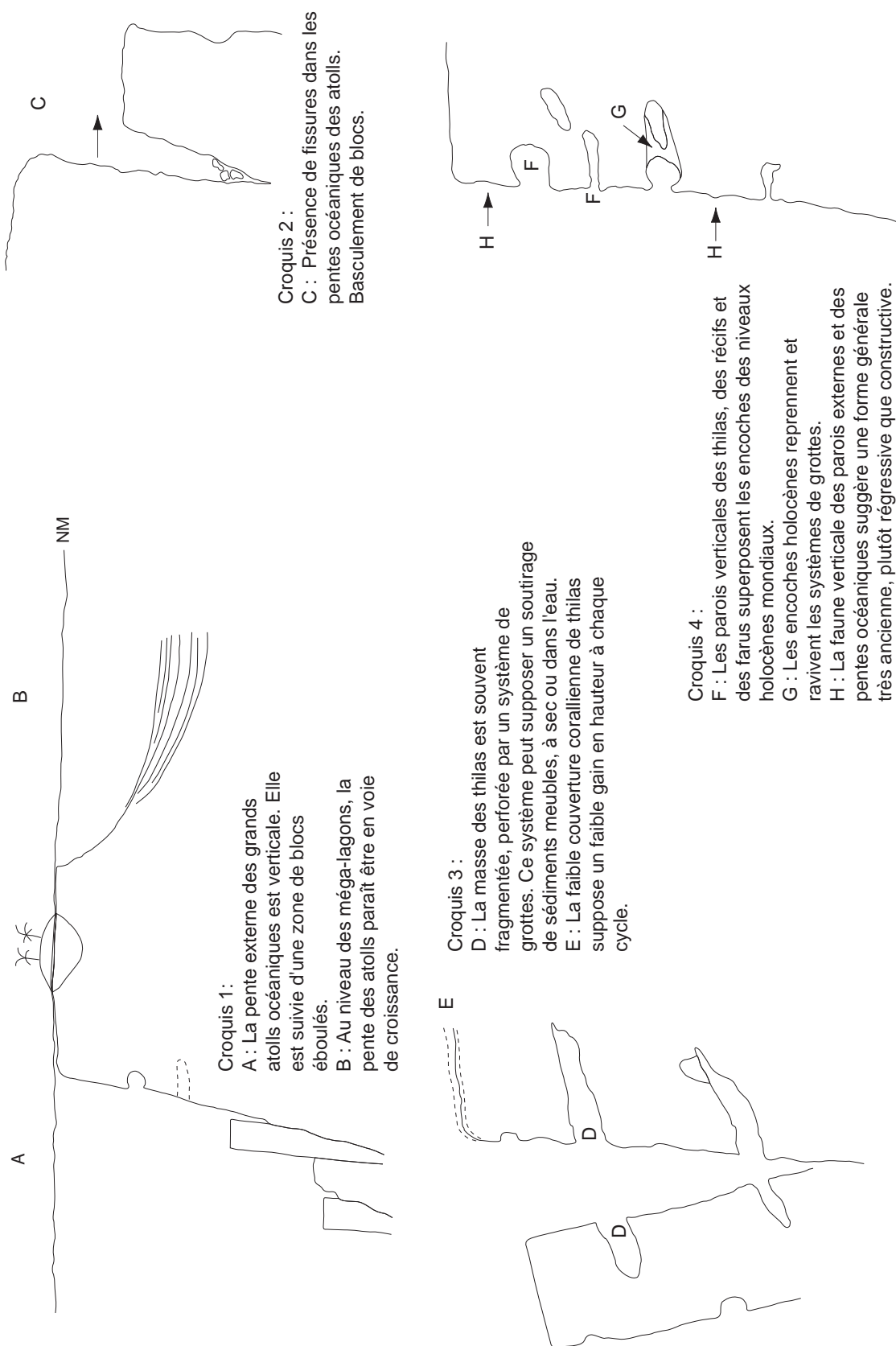
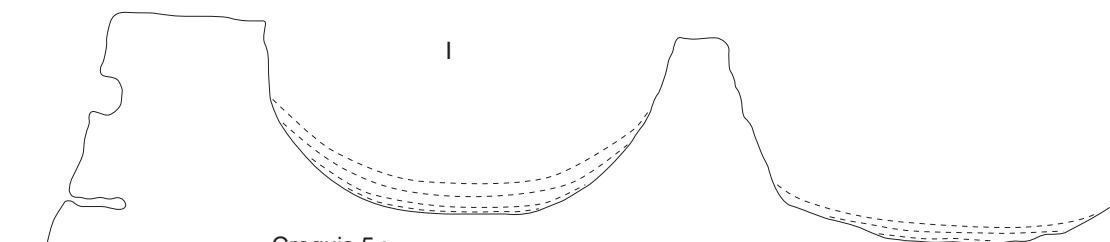
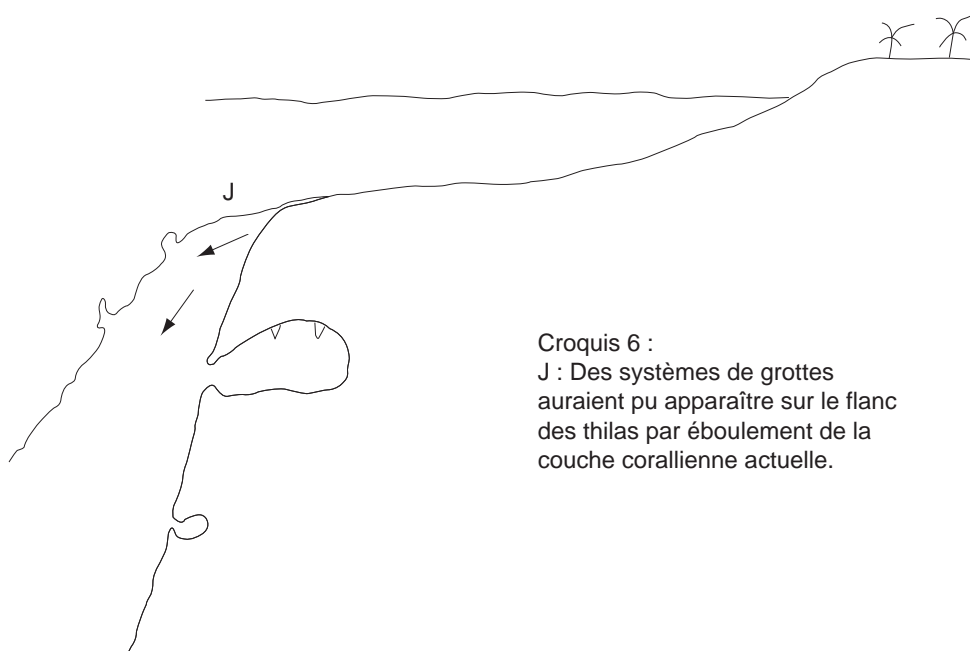


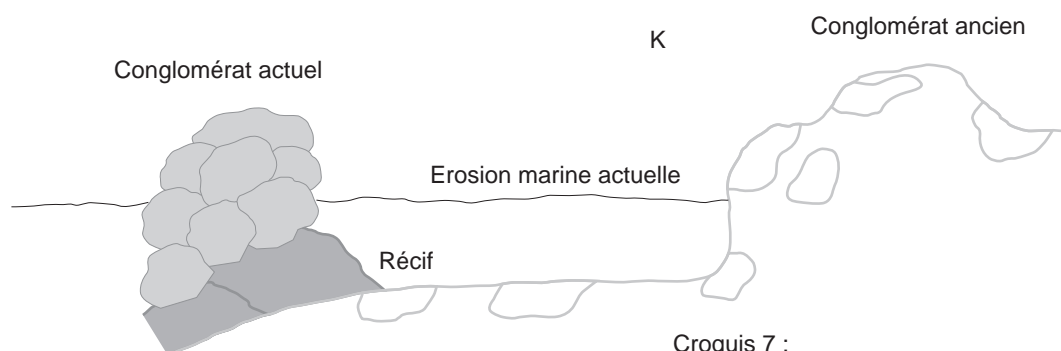
Figure 41 : Autres hypothèses d'évolution pour les mégastructures atolliennes



Croquis 5 :
I : La forme en plan des faros suggère que les lagons sont les centres d'accumulation sédimentaire actuelle. Ainsi, le lagon actuel est situé au-dessus des anciens lagons.



Croquis 6 :
J : Des systèmes de grottes auraient pu apparaître sur le flanc des thilas par éboulement de la couche corallienne actuelle.



Croquis 7 :
K : Des coupes effectuées sur des thilas (ex : Vilingili) suggèrent que le niveau marin au dernier Interglaciaire était très légèrement supérieur à l'actuel.

On sait de plus que les directions préférentielles du réseau karstique suivent celles des contraintes tectoniques principales (cf. Figure 42). Toutefois, rien ne semble expliquer pourquoi les zones de vide se créent à ces endroits là.

Les encoches et les grottes peuvent être difficiles à individualiser notamment lorsqu'elles ne forment plus qu'une seule entité. En effet, au cours de plusieurs plongées, nous avons pu constater que certaines grottes se confondaient avec des encoches. Leur genèse est toutefois différente car si l'encoche marque le stationnement et l'érosion par un niveau marin, la grotte est une excavation, d'origine karstique évidée par l'action érosive des vagues. Dans certains cas, on peut observer la formation d'une arche mince et de grande taille¹⁸ qui correspond au stade ultime de l'évolution de la grotte. Il s'agit, par exemple, de l'arche sous-marine du récif de Rasfari, qui est la seule arche que nous avons pu observer. Située à – 40 m, elle apparaît comme une forme aboutie ayant subi une érosion mécanique des vagues puis une érosion subaérienne. Toutefois, l'extrême finesse de sa partie supérieure (cf. Figure 43 - annexe) nous laisse interrogative. En effet, comment une morphologie karstique aussi fine a-t-elle pu rester en place sans s'effondrer sous les effets gravitaires et/ou les effets érosifs marins ou subaériens combinés.

Les grottes sous-marines semblent être connues depuis longtemps par la population maldivienne car de nombreuses îles portent le suffixe ou le préfixe « hulhu » qui signifie grotte en dhivehi. Nous serions donc susceptibles de trouver ces morphologies lors d'explorations sous-marines, dans 18 îles de l'archipel. Dans certains ouvrages de plongée (Amsler K., 1995), l'archipel des Maldives est connu par la civilisation chinoise, grâce à une tradition orale, comme les « montagnes de Liu » dont les habitants auraient vécu dans des grottes.

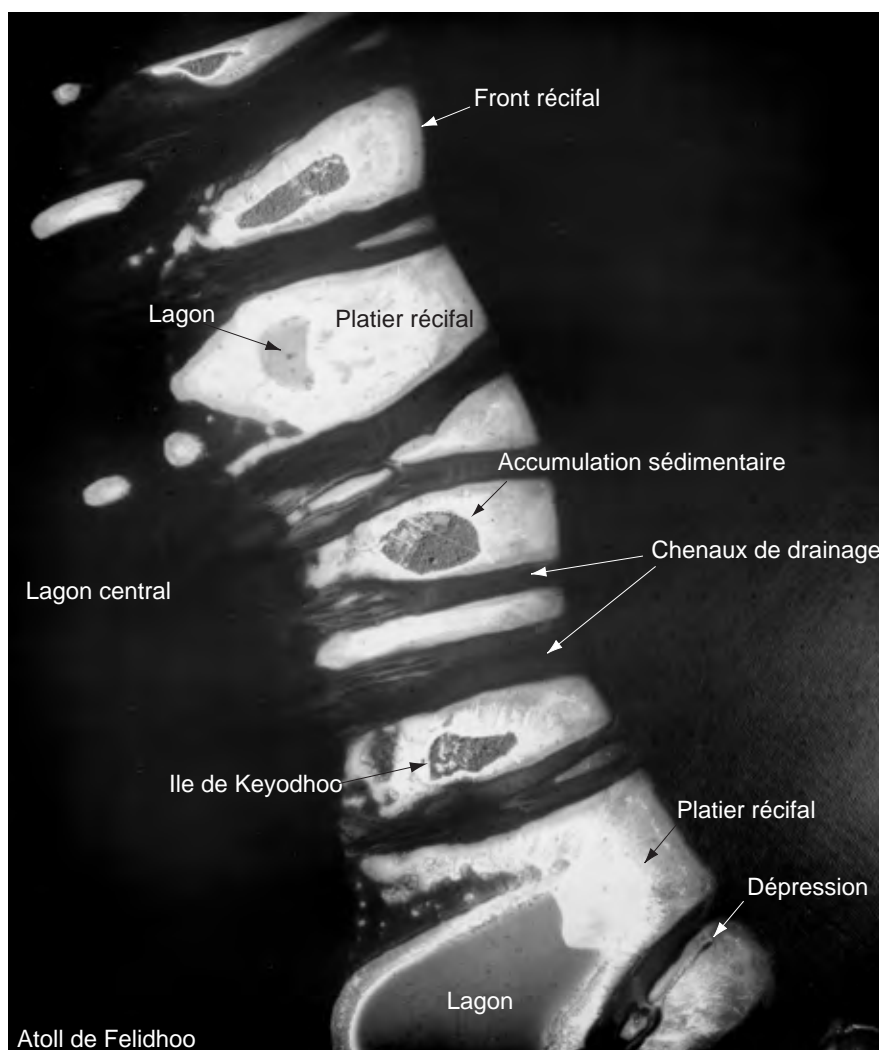
Lors de notre première visite de terrain dans l'atoll de Funafuti, les personnes âgées de notre famille nous parlaient de l'existence, dans l'île de Nanumaga d'une grosse entaille sous le niveau marin actuel. Elle correspondait, d'après la légende, à une « large house under the sea ». Après des recherches bibliographiques, nous avons découvert que cette grotte avait livré ses secrets plus de dix ans auparavant, sans pour autant que la population en soit informée. Cette grotte a, en effet, été retrouvée en 1986 à plus de 40 m sous le niveau marin actuel par deux plongeurs sur le récif nord de l'île de Nanumaga (Anonyme, 1987). D'après leurs récits, l'on retrouve dans la grotte des signes évidents de présence humaine, notamment un reste de feu, datant certainement de plus de 8 000 ans. Cette découverte a remis en cause la théorie de l'implantation humaine dans le Pacifique, que l'on supposait se placer autour de 4 000 ans. Il ne s'agit pourtant pas de la seule découverte d'une civilisation plus ancienne dans le Pacifique.

¹⁸ piliers de moins d'un mètre de diamètre et jusqu'à près de six mètres pour le diamètre de l'arche

Figure 42 : Exemples de morphologies karstiques



La direction
préférentielle d'un
réseau karstique
semble suivre celle
des contraintes
structurales



En effet, on a pu identifier, sur l'île des Pins (Nouvelle-Calédonie), des tumuli construits par l'homme dont les datations ont révélé des âges compris entre 8 000 et 3 000 BP. Toutefois, l'absence de publications scientifiques sur ce sujet nous impose la prudence.

Il est souvent difficile de séparer les réseaux de grottes (avec une concentration maximale entre 20 et 30 m), des grottes retouchées (à des profondeurs variées) et les encoches de stationnement, bien nettes, des encoches longues à profil caractéristique. Le tout pouvant se retrouver en eau libre après écroulement du manteau corallien superficiel ou être caché par la croissance corallienne actuelle.

Comme nous venons de le voir, toutes les parois verticales des pentes récifales sont érodées et criblées d'excavations de morphologies, de tailles, et de localisations différentes, ce qui implique que :

- ces formes ont été retravaillées par l'action mécanique des vagues ;
- les arches sont des formes abouties de plusieurs grottes après dissection karstique ;
- les encoches correspondent à un niveau marin durant l'élévation du niveau de la mer à l'Holocène (Pirazzoli P.A., 1986 ; Anderson R. C., 1998 ; Laborel J. *et al.*, 1999).

D'autres formes karstiques ou supposées ont pu être individualisées durant les plongées. Au regard du boyau, de plusieurs dizaines de mètres de long, identifié sur l'île soulevée de Walpole (Genthon P. *et al.*, 2001), nous supposons que celui identifié entre - 35/- 40 m dans l'atoll de Seenu correspond à une ancienne galerie souterraine¹⁹ (cf. Figure 44), dont le fond n'a pu être identifié. Dans certaines grottes, nous avons pu également observer des formes de concrétion de calcite de type stalagmitique (cf. Figure 44).

La présence d'une importante sortie d'eau douce depuis l'île d'Aidhoo vers l'océan, dans l'atoll de Maalhosmadulu sud, nous a une fois de plus interrogée. Cette source sous-marine était très facilement identifiable car elle était plus trouble et plus froide que l'eau environnante. Ce type de résurgence a été largement observée dans d'autres îles récifales (Bonem R.M., 1988). Il doit son origine aux phases d'émersion du niveau marin, durant lesquelles l'eau météorique a modelé des formes caractéristiques, en permettant la constitution d'un niveau aquifère.

Les morphologies élaborées durant les bas niveaux marins par dissolution de calcaire corallien ou de grès corallien pré-holocène sont difficiles à prélever pour analyse avec les seuls outils que sont le marteau et le burin. L'érosion y est trop importante (cf. Figure 45) et la construction sub-actuelle par dessus le substrat ancien est souvent trop épaisse, polluant donc l'échantillon.

L'observation des formations récifales, bien visibles à faible altitude par photographies aériennes, nous a permis de relever quelques formes caractéristiques de modelés karstiques comme par

¹⁹ J. Laborel (2004) – Communication personnelle

Figure 44 : Exemples de profils sous-marins d'après les variations relatives du niveau marin dans l'atoll d'Addu (d'après J. Laborel)

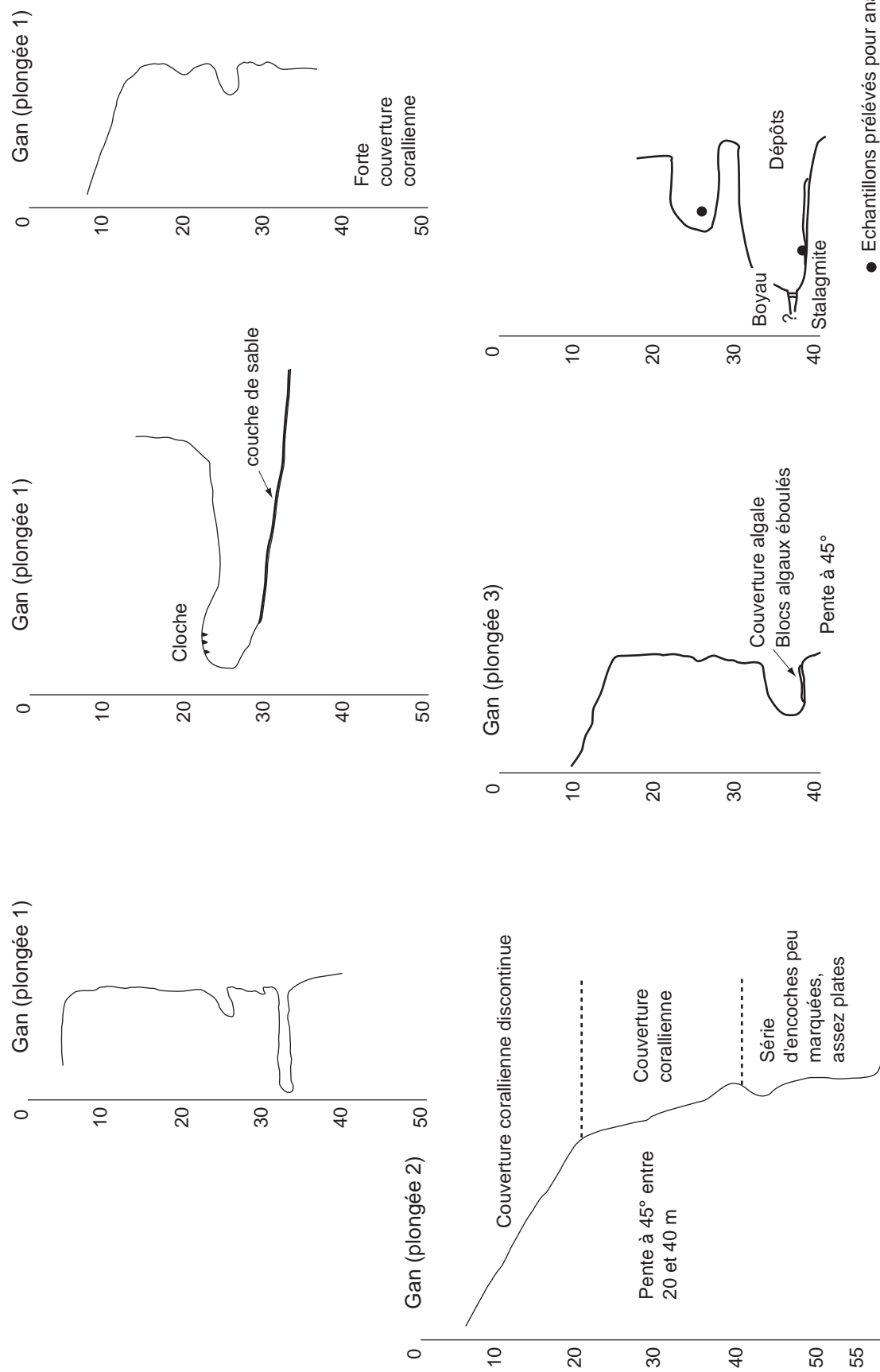


Figure 45 : Morphologies sous-marines, île d'Hulhudhoo - Atoll de Maalosmadulu sud

Paroi d'une grotte à - 20 m



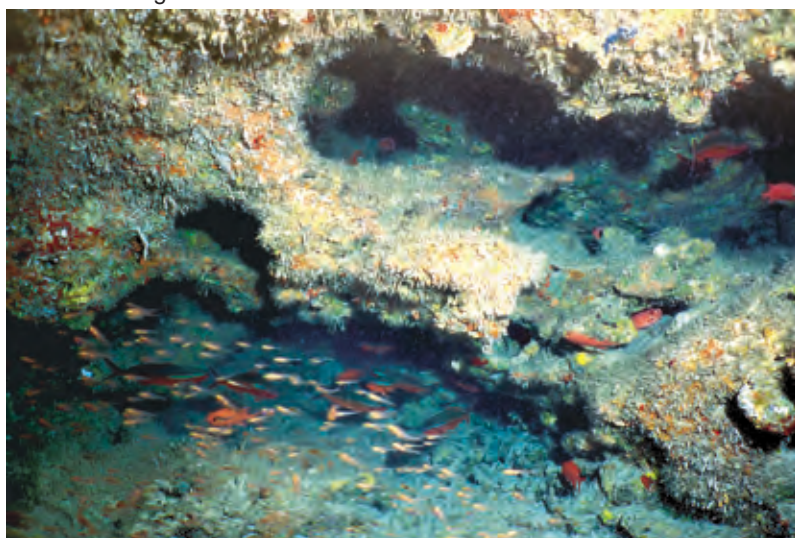
(Cliché J.L.)

Grotte à - 29 m



(Cliché J.L.)

Plafond de la grotte



(Cliché J.L.)

exemple les vasques (cf. Figure 46) dans la partie sud-sud-ouest de l'atoll d'Huvadho (Gaaf Dhaal). Elles sont nombreuses, peu profondes et donnent un aspect alvéolé caractéristique de certains lagons cloisonnés. Ces cavités, en nids d'abeille, sont séparées par des cloisons qui sont proches de la surface de la mer ou qui la dépassent légèrement durant les basses mers. Elles servent désormais de pièges à sédiments. Nous pourrions rapprocher cette morphologie de celle d'un lagon réticulé (Guilcher A., 1988) comme à Mataïva, Belize (Guilcher A., 1988 ; Bourrouilh - Le Jan F.G., 1990) qui consiste en un récif à cloisons anatomosées délimitant des cellules (Battistini R. *et al.*, 1975).

Ces formes auraient pu être créées durant un bas niveau marin assez proche de l'actuel, comme celui auquel correspond l'encoche individualisée à - 5 m..

D'autres dépressions observées sur les platiers récifaux (cf. figures 47) nous laissent penser à des cavités karstiques de type dolines, expression typique du karst de surface (Salomon J.- N., 2001) qui possèdent une périphérie marquée et une zone centrale dépressionnaire évidée par dissolution. Ce type de dépression peut être facilement identifiable par photographie aérienne notamment par le développement de phanérogames marines sur sa pente.

A une autre échelle, les fractures identifiées dans les récifs des atolls de Malé nord (Malé, Thilafushi, Hulhulé) et de Malé sud (Embudhoo Canyon) seraient alors des morphologies héritées, résultant d'une érosion subaérienne ou d'une activité sismique durant une période où les conditions de chargement des masses émergées étaient différentes (I.N.Q.U.A., 2000). Ne pourrait-il pas s'agir d'une fracturation de l'édifice pendant un bas niveau marin provoquée par intrusion d'eau météorique ?

Dans certains cas, les colonies coralliennes nous ont permis de souligner ces morphologies héritées.

Les atolls des Tuvalu (Swartz, *in* Guilcher A. 1992) et des Maldives ont été sujets à une dolomitisation de leurs structures. Il s'agit « d'un phénomène interne et profond, qui est lié, à une pénétration centripète d'eau océanique profonde à travers le versant perméable et karstifié de l'atoll » (Guilcher A., 1992). D'après ce même auteur, la dolomitisation « a été un processus de profondeur, lié à une pénétration latérale d'eaux océaniques dont les propriétés et teneurs sont favorables à une diagenèse dans des calcaires récifaux extrêmement vacuolaires ». Ce phénomène confirme tout à fait l'aspect poreux de l'édifice récifal, même sur de grandes profondeurs.

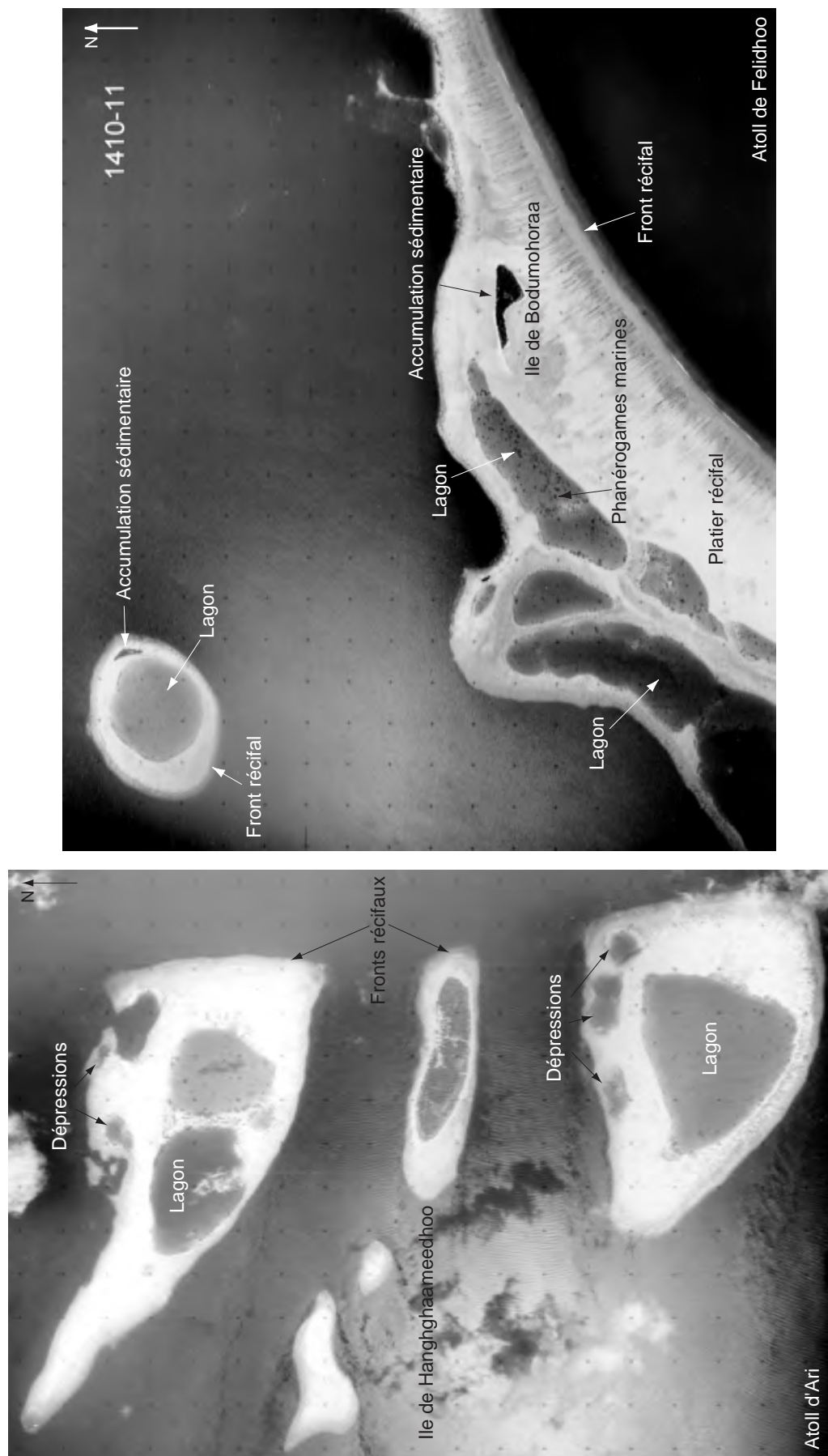
D'après F.G. Bourrouilh-Le Jan (1990), la dolomitisation des atolls implique trois faits :

- « une surface de discontinuité stratigraphique entre la zone dolomitisée sous-jacente et les dépôts surincombants ;
- une longue émergence suivie d'une transgression marine ;
- un mouvement d'élévation suivi d'une subsidence du point de vue tectonique ».

Figure 46 : Structure alvéolaire dans la partie sud-ouest de l'atoll d'Huvadhoo



Figure 47 : Mise en évidence de paysages karstiques immergés



3.2.1.3. Les *Breccia*

Il s'agit d'un des seuls témoins encore visible d'un épisode transgressif dans l'île de Fongafale. David et Sweet (1904, *in* (Schofield J.C., 1977) définissent cette morphologie, constituée essentiellement de brèches coralliennes bien cimentées incluant de gros blocs de corail, des graviers et du sable corallien comme des *breccia*, tandis que, pour McNeil (Mcneil F.S., 1954) il s'agit d'un faciès d'arrière récif. Ce terme italien est utilisé pour définir une roche détritique formée de fragments anguleux.

L'inclinaison de la structure vers le lagon et son escarpement en direction de l'île actuelle suggèrent un beach rock mis en place lors d'un haut niveau marin, mais l'absence de stratification subhorizontale nous fait douter de cette origine. Pourtant, il nous apparaît comme évident que ces biostromes²⁰ semblent exprimer un haut niveau marin. Les mesures que nous avons effectuées tendent à confirmer cette hypothèse. La dénivellation mesurée entre le platier récifal actuel et cette accumulation est de $+1 \text{ m} \pm 20 \text{ cm}$ (cf. Figure 48).

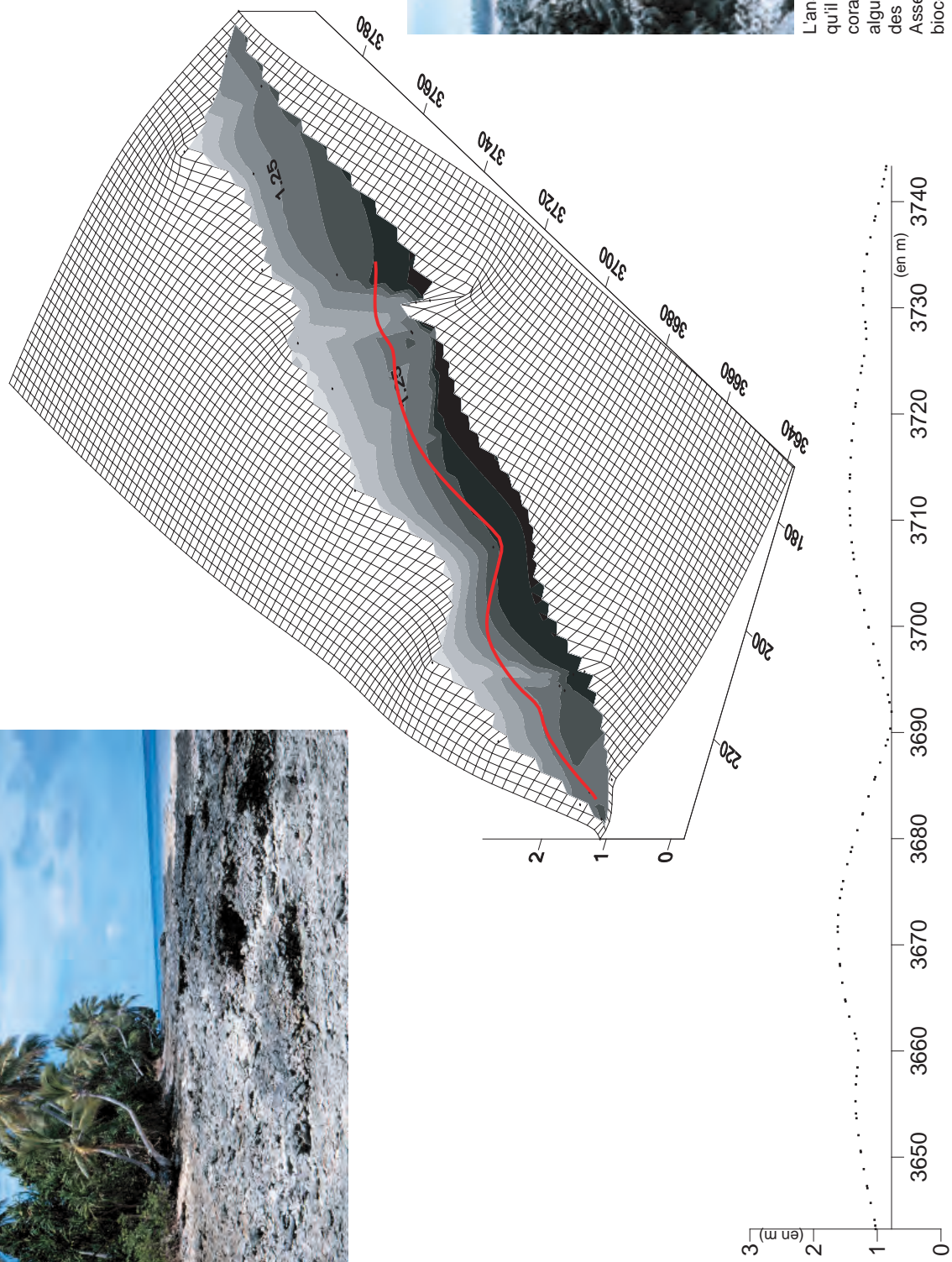
D'après C. Darwin (1962) le « *brecciated coral rock* » est une plate-forme de conglomérat corallien. Pour C.D. Woodroffe *et al.*, (1999) cette accumulation d'éléments grossiers correspond à un platier récifal émergé fossile. Les datations révèlent des âges mi-holocènes compris entre $4\,010 \pm 85$ et $3\,050 \pm 85$ ans BP. Pour C.D. Woodroffe et R.F. McLean (1994), ce platier récifal fossile s'est mis en place lorsque le niveau marin était situé à environ un mètre au dessus du niveau actuel.

Des recherches menées sur l'atoll de Farquhar (Battistini R. et Jouannic C., 1979) montrent une morphologie similaire à celle évoquée précédemment. D'après les datations qu'ils ont obtenues, ces formes légèrement surélevées par rapport au niveau actuel se seraient mise en place entre 4 300 et 3 700 BP. Ce platier induré constitué à $+1 \text{ m} - +1,5 \text{ m}$ sert de base à l'édification des îles. Il n'est localisé que ponctuellement, bien que les auteurs considèrent que son extension était très certainement plus grande, mais la corrosion l'a ramené au niveau de la plature actuelle (Battistini R. et Jouannic C., 1979). Il faut être, en effet, étonné de la rapidité de la corrosion qui est capable dans les îles tropicales « de réduire un volume rocheux aussi considérable, et sur d'aussi grandes surfaces ».

A une autre échelle, il convient de souligner très brièvement les formes érosives observées sur les méga-structures de l'archipel. Ainsi, la pente externe océanique de la plupart des atolls et/ou des faros, situés au sein des méga-atolls ou au bord de passes profondes, est souvent verticale avec de nombreux compartiments éboulés. Les effondrements peuvent être récents, comme ceux qui ont été observés à la Jamaïque (Goreau T.F. et Land L.S., 1974) ou anciens, datant du Dernier Maximum Glaciaire. D'après les observations que nous avons menées, les deux types sont largement identifiables

²⁰ Accumulation stratiforme d'organismes

Figure 48 : Témoin d'un ancien niveau marin sur le platier lagonaire actuel de l'île de Fongafale (Tuvalu)



L'analyse par lame mince a révélé qu'il s'agissait d'une colonie corallienne encroûtée par des algues (*hydroolithon*) associées à des foraminifères arborescents. Assemblages typiques de bioconstructio corallienne.

Les axes X, Y, Z sont exprimés en mètre

dans l'archipel des Maldives. Ainsi, les éboulements récents sont accompagnés par des cônes sédimentaires. Ces événements se révèlent sur la bordure externe des atolls, là où la pente est forte et où la couverture corallienne est faible. Les effondrements anciens correspondent, quant à eux, à des petites failles anciennes qui s'exposent de façon subverticale (plus de 60°) avec des faces angulaires. On les retrouve sur les thilas et les bordures récifales qui sont souvent bordés par un nombre de blocs profonds, avec des surfaces planes, qui semblent correspondre à des éléments cassés et éboulés depuis la structure principale. Ces morphologies érosives sont connues, mais leur interprétation reste assez floue.

3.2.2. Les formes construites

3.3.2.1. Les microatolls

Dans sa forme la plus simple, le microatoll est une construction corallienne qui croît horizontalement par anneaux successifs et qui est limité dans sa croissance verticale par le niveau de la mer. Ainsi, un microatoll possède une périphérie vivante et un centre nécrosé qui est le résultat d'une dissolution et d'une bioérosion par des algues filamenteuses et des bactéries (Hopley D., 1986). Cette érosion centrale est toutefois stoppée une fois que des algues calcaires s'y sont déposées. Agassiz comparait cette morphologie à des « *miniatures atolls* » (Agassiz, 1895, *in* Hopley D., 1982), mais le terme spécifique a été forgé par Wood-Jones (Wood-Jones, 1910, *in* Hopley D., 1982).

Le microatoll de *Porites* est un organisme constructeur pionnier, et le plus représenté dans les édifices coralliens mondiaux bien qu'il existe également des microatolls de *Goniapora*, d'*Héliopora* et d'*Acropora palifera*. Il se situe généralement sur les platiers récifaux exposés au vent.

Les *Scléractiniaires*, du fait de leur vie fixée et de leur plasticité morphologique en fonction des conditions écologiques, sont, en effet, de bons indicateurs paléo-environnementaux (Laborel J., 1978 (b)). Pour être des enregistreurs climatiques et marégraphiques, il est primordial que les colonies coralliennes massives de type *Porites* soient *in situ*. Elles fournissent ainsi une estimation approchée du niveau de la mer, maximale pour les témoins ennoyés et minimale pour les témoins émergés.

L'exploitation de mégacolonie pluridécimétrique, comme celui du platier récifal NNE de l'île de Vilingili, représente une opportunité d'étude paléoenvironnementale et paléoclimatique sur plusieurs siècles. Il s'agit d'un agent morphodynamique majeur de l'évolution de l'édifice corallien ainsi qu'un biomarqueur potentiel des interactions océan-atmosphère. Cette large colonie, de 3 m de rayon et de seulement 20-25 cm d'épaisseur, est une forme peu profonde, située à environ un mètre sous le niveau marin moyen actuel, à 100 m en avant du trait de côte actuel. Sa morphologie révèle une structure ancienne qui s'est constituée pendant plusieurs siècles et qui n'a pas donc pu être

déplacée par la houle. Encastrée avant sa dissection dans le platier récifal (cf. Figure 49), elle se révèle, après son déblaiement, être une forme tronquée et polie indiquant très certainement une origine ancienne. La mise à nu de ce microatoll révèle son aspect concentrique et sa localisation au sein du platier suggère qu'il est encapuchonné. Son sommet a subi une érosion horizontale importante correspondant très certainement à un polissage attribué à une plage sus-jacente (cf. Figure 50). Ce microatoll n'a pas dû être exposé lors d'une phase régressive du niveau relatif de la mer, car on ne note aucune forme d'érosion subaérienne sur le sommet ou sur ses pourtours, mais lors d'une oscillation négative qui aurait motivé le polissage de l'appareil par des matériaux grossiers et du sable. L'ensemble de ses caractéristiques nous permet d'exclure sa construction lors du Dernier Interglaciaire et nous oriente plutôt vers un stade régressif au sein de l'Holocène, suffisamment long pour permettre l'édification d'une telle colonie. Des échantillons prélevés au sein de la colonie sont actuellement aux mains du Professeur Mörner à fins d'analyses en laboratoire et devraient nous permettre d'affiner son âge.

Les travaux menés par C.D. Woodroffe *et al.* (1994) sur les microatolls fossiles des îles de Cocos Keeling permettent d'envisager, autant que faire se peut, une histoire eustatique régionale. Les microatolls identifiés sur le platier récifal actuel de *Pulu Pandan* et *West Island* sont les témoins d'une baisse avérée du niveau de la mer, entre 40 et 80 cm par rapport au niveau marin actuel, datant de 3 000 ans BP (Woodroffe *et al.*, 1990).

Des microatolls de *Porites* ont pu être trouvés à des positions supérieures par rapport au niveau relatif actuel de la mer. Lors de l'expédition scientifique de 1896, un chercheur (Sollas, 1904 *in* (McLean R.F. et Hosking P.L., 1991) mentionnait leur présence ainsi que celles de colonies d'*Heliopora* au sein d'une zone de mangrove dans l'atoll de Funafuti. En effet, le microatoll se situait dans une zone submergée sous « plusieurs pieds d'eau » durant les grandes marées, mais était émergé durant une grande partie de la journée. Les coraux eux-mêmes étaient en partie recouverts par une levée de galets cimentés. Ce microatoll avait été interprété comme une structure corallienne interrompue dans sa croissance par un niveau marin supérieur à l'actuel.

« S'il est admis que la surface des *Porites* montre un ancien niveau marin, cela devient toutefois un problème lorsque l'on essaye de comparer ce niveau avec le niveau existant de la mer. Le sommet du *Porites* culmine à plus de 40 cm²¹ au dessus du niveau moyen de la mer. Nous concluons qu'un changement du niveau marin s'est opéré dans une direction négative d'une importance de 1,20 m²² à travers le site de mangrove depuis la croissance de cet ancien récif ». Après observations, l'ancien trait de côte a été estimé entre 1,3²³ et 2 m²⁴ (David et Sweet, 1904 *in* (McLean R.F. et Hosking P.L., 1991).

²¹ 1,4 pied

²² 4 pieds

²³ 4,5 pieds

²⁴ 6,5 pieds

Figure 49 : Phase de démontage d'un microatoll - île de Vilingili
atoll de Malé nord - Maldives



Grand microatoll de Porites érodé à - 1m - avant démontage (Cliché J.L.)



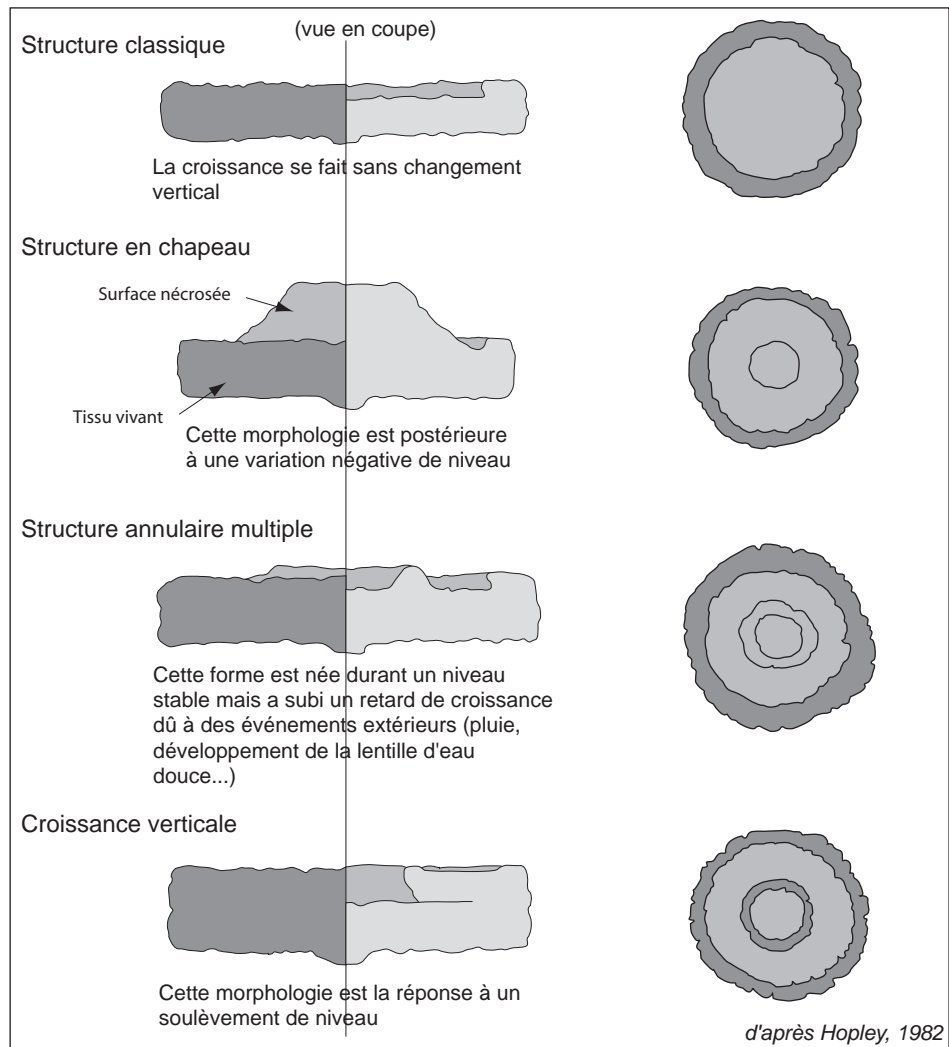
Début de démontage en oignon du microatoll (Cliché de J.L.)



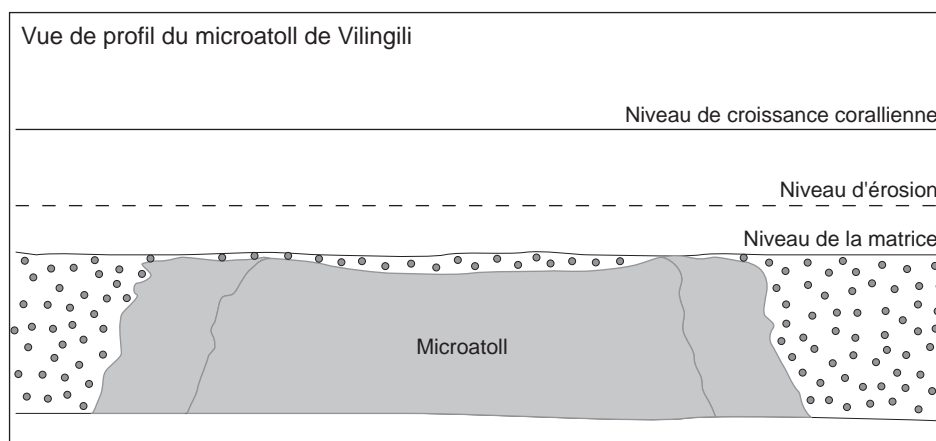
Mise en évidence du microatoll après démontage (Cliché J.L.)

Figure 50 : Interprétation de l'édification et de l'évolution des microatolls d'après les variations relatives du niveau marin

Pour des microatolls actuels :



Pour des microatolls fossiles :



Durant cette expédition, des colonies coralliennes vivantes ont pu être identifiées à des altitudes anormalement élevées dans l'atoll de Funafuti. Ainsi, on a recensé des colonies d'*Heliopora* et de *Porites* dans le nord de l'île d'Amatuku. Ces colonies évoluaient dans une « piscine naturelle » à 0,6 cm²⁵ au-dessus du plus bas niveau de marée de printemps. La situation rencontrée par les scientifiques dans l'atoll de Funafuti est analogue à celle dont il est fait mention dans la littérature scientifique de l'époque où une hauteur anormalement élevée de microatolls morts a été observée dans de nombreux sites du Pacifique ouest comme dans les îles Marshall, les îles Gilbert. Depuis, d'autres hauts témoins ont été identifiés en 1973 sur la Grande Barrière (Hopley D., 1982), ainsi qu'aux Fidji où P.D. Nunn (1995) date des microatolls émergés, situés entre 0,20 m et 1,80 m au dessus du récif actuel, entre $3\,083 \pm 82$ ans et $4\,740 \pm 95$ ans.

L'utilisation de témoins coralliens anciens en position de croissance, pour identifier des paléoniveaux marins, doit être menée avec réserve car ils ne localisent pas obligatoirement avec exactitude le niveau de la mer mais seulement un niveau minimum (Laborel J., 1967).

3.3.2.2. Du conglomérat à la plage ancienne

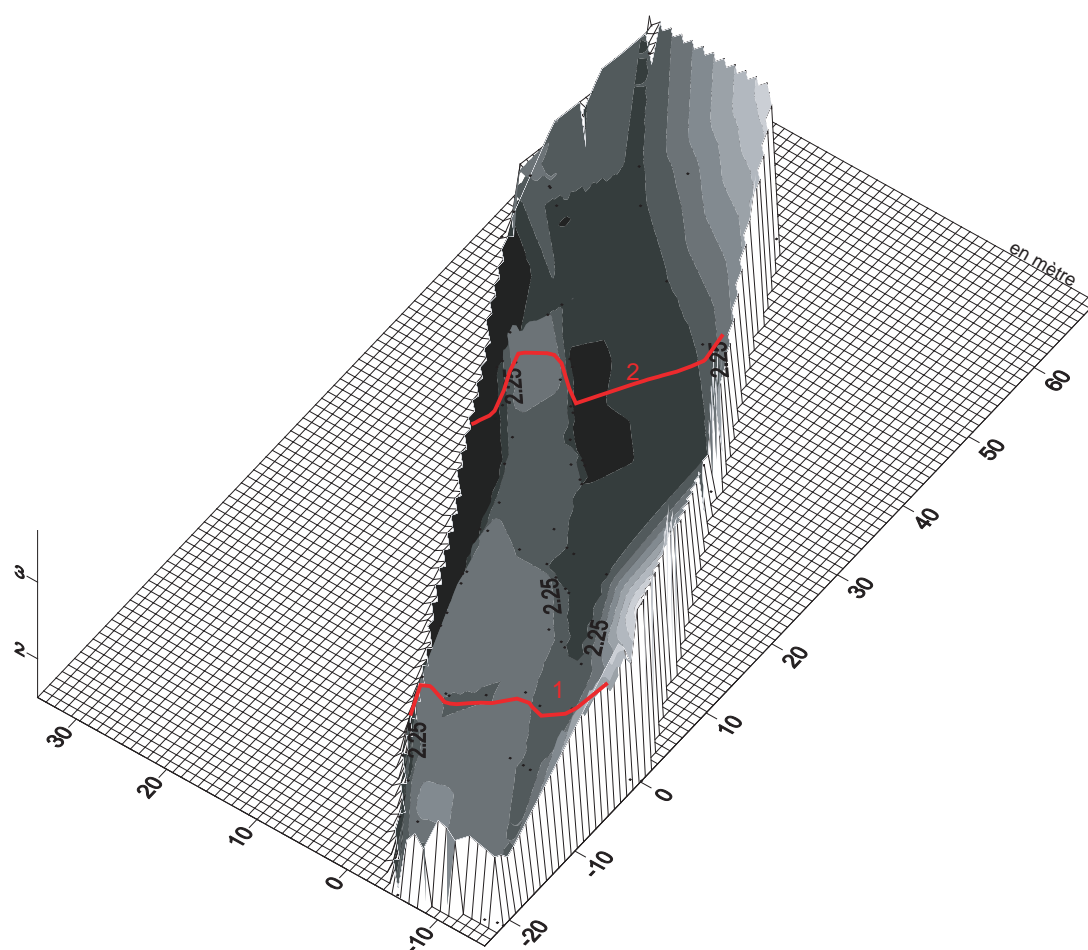
Des niveaux de cimentation peuvent fournir des informations sur le niveau relatif de la mer. Il s'agit, par exemple, du beach rock qui se crée toujours en zone intertidale mais dont la présence en position haute par rapport au niveau actuel permet d'envisager un niveau plus élevé, aussi furtif fût-il, car il possède la faculté de se former rapidement.

Ainsi, dans l'île de Fulhadhoo, atoll de Goidhoo (cf. Figure 51), nous avons pu observer la présence d'un beach rock d'environ 500 m de long, constitué de plusieurs dalles, passant à l'ouest d'un conglomérat corallien. Le beach rock, à sédimentation non constante, est constitué de blocs roulés de quelques cm à 50 cm de diamètre dans lesquels des morceaux de poterie sont interstratifiés. Ces deux éléments sont érodés sur leurs faces exposées au rivage. Des vermetes vivants, nous servant d'indicateurs biologiques du niveau moyen de la mer, sont situés à + 30 cm (± 20 cm) en dessous du plus haut niveau de beach rock, qui se situe à 50 cm du dépôt précédent. Le beach rock et le conglomérat corallien associé sont d'âge holocène et tendent à confirmer l'idée d'un niveau marin légèrement supérieur à l'actuel, qui a pu éroder des dépôts anthropiques d'une période précédente. La nature du ciment, qui est actuellement en cours d'analyse, devrait permettre de connaître l'origine de ce conglomérat. S'agit-il d'une formation de petits fonds ou d'une évolution horizontale de l'île, montrant simplement un phénomène érosif ?

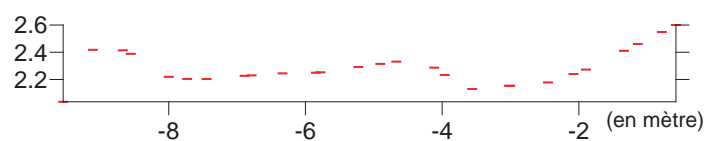
Dans l'île de Vilingili, on note également la présence d'un conglomérat consolidé formé par des têtes coralliennes roulées cimentées. Il est surélevé par rapport au niveau biologique vivant (+1 m

²⁵ 2 pieds

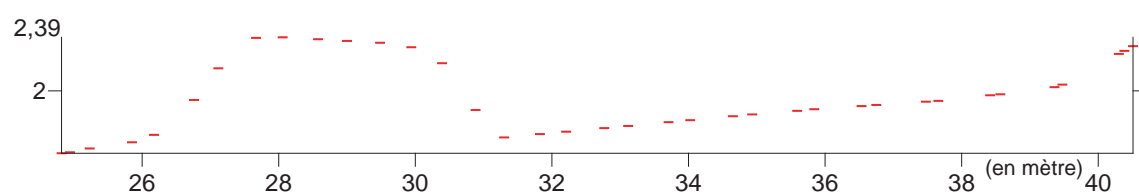
Figure 51 : Levé topographique du beach rock de l'île de Fulhadhoo dans l'atoll de Goidhoo



Profil 1



Profil 2



Les axes X,Y, Z sont exprimés en mètre

± 0,5 m) et est entaillé par le trait de côte actuel, représentant un stade récifal antérieur (cf. Figure 52). Des échantillons ont été prélevés pour des analyses de cimentation ainsi que des datations. L'analyse de la nature des ciments devrait nous renseigner également sur l'origine de ce conglomérat : a-t-il été constitué dans des eaux de petits fonds ou s'agit-il d'une morphologie vadose ?

En arrière de ce dépôt, nous avons identifié une stratification de paléo-rivage remaniée par les dépôts actuels. Ainsi, du platier récifal jusqu'à l'île végétalisée, on observe un beach rock, composé d'éléments roulés, que N-A. Mörner a identifié comme un niveau Interglaciale, puis le niveau actuel des plus hautes mers possibles au dessus duquel s'observent deux gradins de plage holocènes (cf. Figure 53 - annexe).

3.3.2.3. Les mangroves

La mangrove est un bon indicateur biogéographique de la position des niveaux marins. En effet, elle se situe dans des zones côtières de faible énergie comme les baies ou tout autre site d'abri, et se développe de façon optimale dans l'étage intertidal. Les mangroves sont donc les témoins de niveaux marins antérieurs puisqu'elles restent au niveau de celui qui les a créées.

D'autres indicateurs présents sur l'île de Vilingili nous laissent également envisager la présence d'un haut niveau marin dans l'archipel. Il s'agit de deux *Avicennia* présents en avant du trait de côte actuel, sur le platier récifal émergé durant les hautes mers (cf. Figure 54). Ces arbres qui se localisent surtout en front de mer caractérisent les vasières soumises à l'action de la marée subissant donc l'alternance de l'envasement et du désenvasement. Cette espèce, peuplant les mangroves, nous laisse envisager la présence antérieure d'une zone à mangrove s'étendant dans la partie sud-orientale et méridionale de l'île. Entre la base de leurs troncs et leurs systèmes racinaires enchevêtrés dans des coraux situés en position surélevée par rapport au platier actuel, il y a entre + 50 cm et + 1 m de différence. La disparition de la mangrove, causée par le déblaiement des matériaux situés autour des palétuviers, nous informe sur la reprise de l'érosion dans ces parties de l'île. D'après l'analyse par photo-interprétation que nous avons pu faire de l'île de Vilingili en 1969, les *Avicennia* étaient déjà présents en avant du trait de côte actuel. Il nous a été raconté qu'ils servaient d'amer pour les prisonniers qui gagnaient Malé la nuit et qui revenaient au lever du soleil, lorsque Vilingili était une île-prison, c'est-à-dire avant 1973 puisque c'est à cette date qu'elle a été transformée en île-hôtel.

Au sein de l'île de Goidhoo, nous avons effectué des prélèvements à l'aide du tarière à main dans une petite mangrove localisée dans la partie nord de l'île, en position d'abri. Les analyses sont encore en cours de traitement par le Professeur Shahidul Islam du département de géographie de l'Université de Rajshahi (Bangladesh), mais l'interprétation des levés de terrain peut nous permettre d'émettre quelques hypothèses. Cette petite mangrove située en arrière du trait de côte actuel est isolée de ce dernier par un cordon de galets. Elle se positionne légèrement supérieure au niveau marin actuel.

Figure 52 : Du conglomérat récifal à la plage ancienne : île de Vilingili (atoll de Kaafu)



Conglomérat de la côte sud-sud-est



Plage ancienne surélevée

Les anciens dépôts sont en voie de démantèlement



Figure 54 : Témoins d'un haut niveau de sol dans l'île de Vilingili, atoll de Malé nord



En effet, d'après la limite des vermetes, la mangrove se situe entre + 0,55 et + 0,75 cm, c'est-à-dire entre + 0,75 \pm 10 cm et 0,95 \pm 10 cm (cf. Figure 55).

Dans l'île de Fongafale, il existe une zone de mangrove localisée dans la partie nord-orientale de l'île. Elle est isolée de la haute mer par un cordon de galets et doit recevoir des eaux océaniques renouvelées par percolation des eaux marines à l'intérieur du substrat calcaire, étant donné la vigueur des arbres qui la composent. Cette zone s'est créée durant un niveau légèrement supérieur au niveau actuel (cf. sous section 3.3.2.1.).

3.3.2.4. Les sols

La présence de sol dans un atoll n'est évidemment pas synonyme de haut niveau marin mais son épaisseur peut indiquer une certaine ancienneté de l'île et son haut positionnement par rapport au niveau marin actuel laisse envisager une histoire eustatique positive. Ainsi, dans trois îles de l'atoll de Maalhosmadulu sud (cf. Figures 56, 57, 58 - annexe), nous avons pu observer un sol bien épais, développé sur un dépôt sableux, situé au-dessus des laisses des plus hautes mers, suggérant une origine ancienne de l'accumulation. En général, le sol des atolls est pauvre avec peu ou pas d'apports en déchets végétaux ; son évolution et son ancienneté peuvent nous être indiquées par sa coloration. La présence d'indices particuliers comme des sols anciens, en voie de démantèlement, dégageant des racines fossiles très fortement ferrugineuses (cf. Figure 59 - annexe), de trois sols distincts en haut de plage (cf. Figure 60), d'un récif immergé situé au-dessus du platier récifal actuel, de stratifications sédimentaires en position surélevée par rapport au niveau marin actuel (cf. Figure 61) fait de l'île d'Hulhudhoo, dans l'atoll de Maalhosmadulu sud, un site privilégié pour l'étude de formations datant du Dernier Interglaciaire ou de l'Holocène.

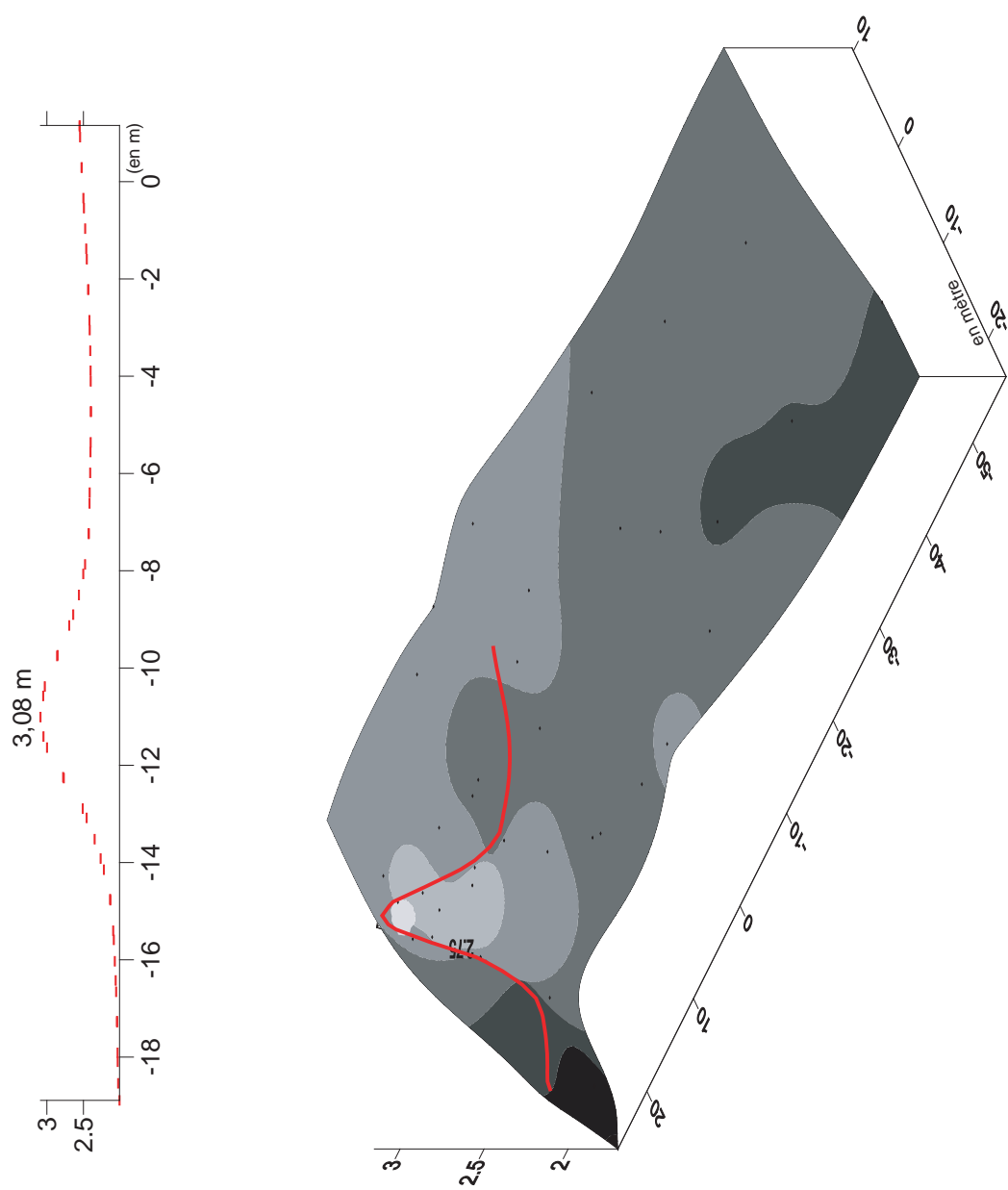
3.3. Quelles sont les origines de ces formes ?

Il faut considérer deux échelles de temps : les grandes périodes glaciaires qui correspondent à des périodicités de l'ordre de dizaines ou centaines de milliers d'années et les fluctuations glaciaires-interglaciaires à l'intérieur d'une période glaciaire qui se mesurent en dizaines de milliers d'années, voire quelques millénaires.

Les phases d'émersion et de submersion du niveau marin contribuent à la morphogenèse des récifs et des plates-formes carbonatées.

Ainsi, les morphologies observées sur nos terrains d'étude sont nées de bas et de hauts niveaux marins engendrés entre le Dernier Interglaciaire et l'Optimum climatique, au sein desquels nous trouverons des phases transgressives ou régressives, dues à des phénomènes globaux et/ou régionaux. Ces phases n'indiquent pas uniquement des variations verticales, positives ou négatives du niveau

Figure 55 : Levé de terrain de la mangrove de l'île de Goidhoo et interprétation d'un échantillon prélevé



Les axes X, Y, Z sont exprimés en mètre

Prélèvement d'environ 1 mètre

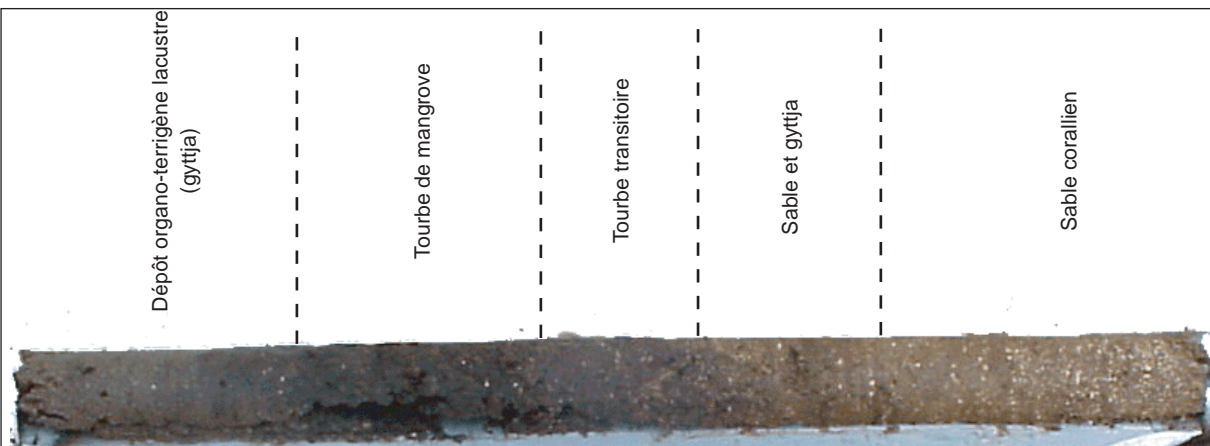


Figure 60 : Essai de reconstruction paléoenvironnementale de l'île d'Hulhudhoo (atoll de Maalhosmadulu sud)



Figure 61 : Profil topographique dans l'île d'Hulhudhoo, atoll de Maalosmadulu sud

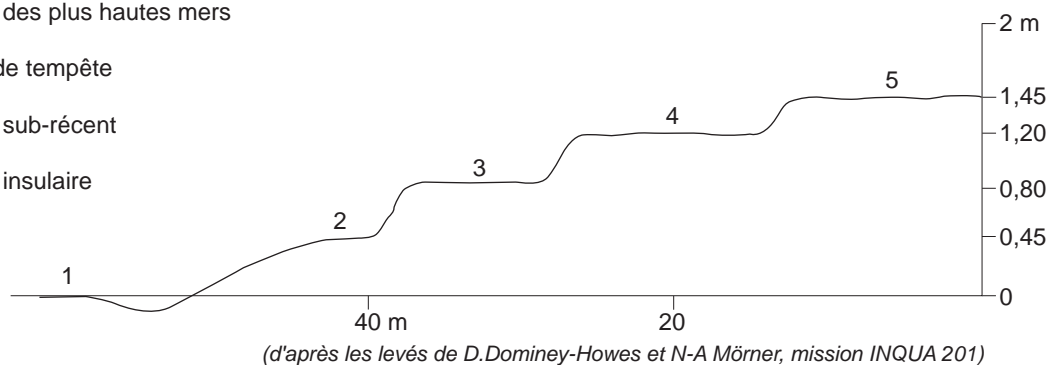
1 : Grès de plage

2 : Niveau des plus hautes mers

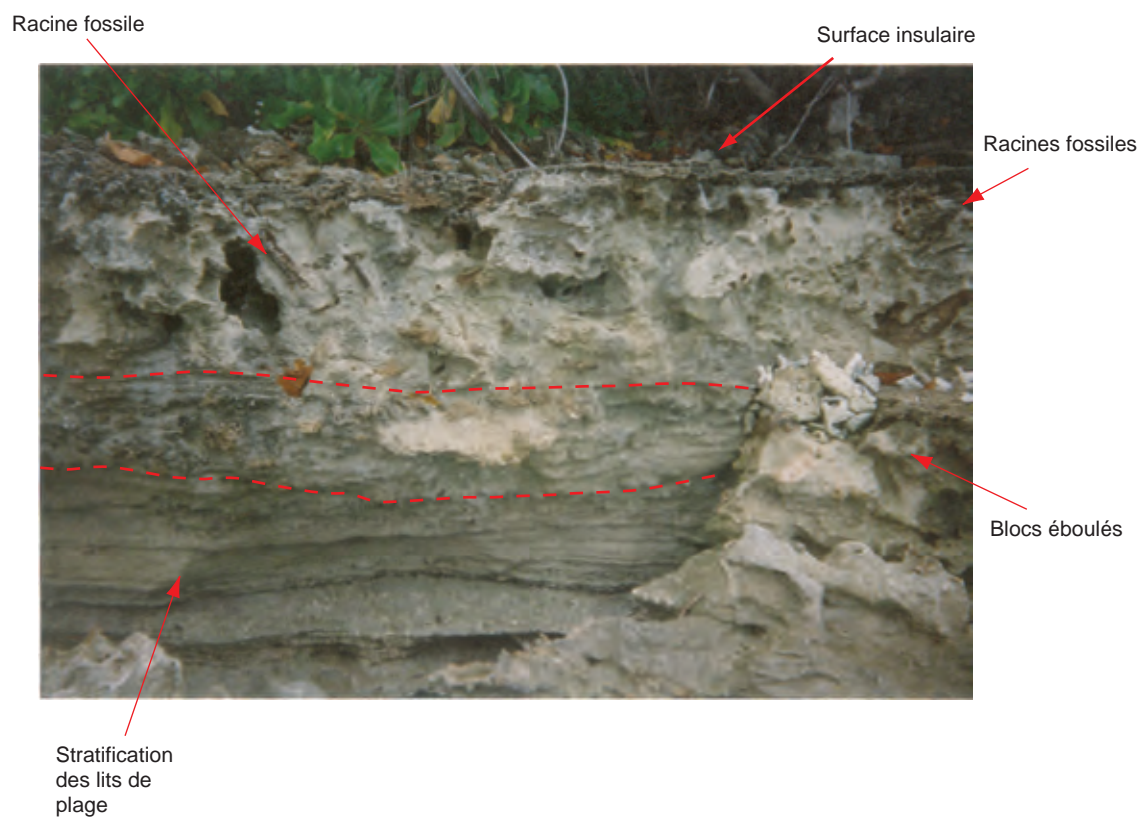
3 : Dépôt de tempête

4 : Niveau sub-récent

5 : Niveau insulaire



Stratification dans le niveau insulaire, en voie de démantèlement



marin, mais impliquent des modifications horizontales à plus grande échelle avec l'enneigement des paysages côtiers...

Il peut être par contre difficile d'identifier des formes nées de variations du niveau de la mer antérieures à une transgression car cette dernière détruit les traces de la transgression précédente.

3.3.1. Le Dernier Interglaciaire

Ce dernier épisode « chaud » devrait nous permettre de caractériser la période actuelle par rapport aux épisodes précédents. Malheureusement, les données concernant les variations du niveau de la mer antérieures à l'Holocène sont plus rares et concernent surtout les récifs de la Barbade, de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, de Tahiti et des Seychelles. De plus, du fait de leur localisation sur des zones de subduction actives, il faut émettre quelques réserves quant aux données collectées sur ces récifs qui peuvent fausser l'enregistrement des variations absolues du niveau marin. Ainsi, il paraît nécessaire de travailler à partir de données collectées dans des zones tectoniquement stables, bien que le concept de stabilité soit particulièrement hasardeux (Mörner N-A., 1996). Les interventions se dérouleront donc de préférence dans les zones où la subsidence n'est plus effective ou dans celles où les mouvements verticaux sont suffisamment réguliers et lents pour permettre d'ajuster les carottages avec les mesures connues de subsidence.

La période oscille selon les auteurs entre 140 000-110 000 BP (Pirazzoli P.A., 1996) ou 130 000 BP-116 000 BP, avec un maximum climatique vers 125 000 BP (I.N.Q.U.A., 2000) ou 120 000 BP (Woodroffe C.D., 1989), A. Foucault et J-F. Raoult, (2001). Cette période correspond au stade isotopique 5 qui appartient déjà au Pléistocène supérieur.

D'après P.A. Pirazzoli (1996), cette période a été très certainement plus chaude, de 4 °C, que ce que l'on a pu avoir durant l'Holocène. Pour C.D. Woodroffe (1989), le niveau marin était sensiblement le même que le niveau actuel, alors que, pour Fletcher *et al.* (1995), il a pu se situer, dans certaines parties du globe, jusqu'à six mètres au dessus du niveau actuel. Il s'agit, par exemple des Seychelles, où des échantillons situés entre + 1,7 m et + 6 m, au dessus du niveau actuel, se sont révélés dater du Dernier Interglaciaire, entre 131 000 et 122 000 BP (Israelson C. et Wohlfarth B., 1999).

D'après N-A. Mörner *et al.* (2004), les témoins de ce haut niveau marin, identifiés dans l'île de Vilingili, se situent entre +1,2/+1,3 m au dessus du niveau actuel. D'autres morphologies observées dans le paysage insulaire, comme certains beach rocks ou certains coraux agglomérés *in situ* comme dans les îles d'Aidhoo et Hulhudhoo (atoll de Maalosmaduludu sud), se rattachent peut-être à ce niveau marin. Certains échantillons, dont l'auteur ne précise pas la localisation dans l'archipel, se sont révélés dater du Dernier Interglaciaire : ils se situent légèrement en dessous, au voisinage proche et jusqu'à +1,2/+1,3 m du niveau actuel (Mörner N-A. *et al.*, 2004).

3.3.2. Le Dernier Maximum Glaciaire

L'ensemble des atolls modernes de l'archipel des Maldives a donc été émergé, ce qui implique une diagenèse météorique, une pédogénèse et une karstogénèse des structures atolliennes. En effet, les atolls ont été karstifiés sous un climat tropical chaud et humide donnant naissance à une morphologie particulière que nous avons exposée précédemment. Pour de nombreux auteurs (Purdy E.G., 1974 ; Hopley D., 1982 ; Bourrouilh - Le Jan F.G., 1990 ; Purdy E.G. et Bertram G.T., 1992 ; I.N.Q.U.A., 2000), cette morphologie karstique née durant les bas niveaux marins est conservée en l'état sous la couverture corallienne actuelle (cf. Figure 62). Ainsi, les fonds colonisés tendent à recouvrir la forme d'un atoll avec des récifs marginaux et des pâtes coralliens au-dessus des formes karstiques.

Lorsque la colonisation est maximale, elle restaure entièrement l'atoll, utilisant la morphologie héritée de la topographie préexistante pour asseoir sa nouvelle construction (cf. Figure 63 - annexe).

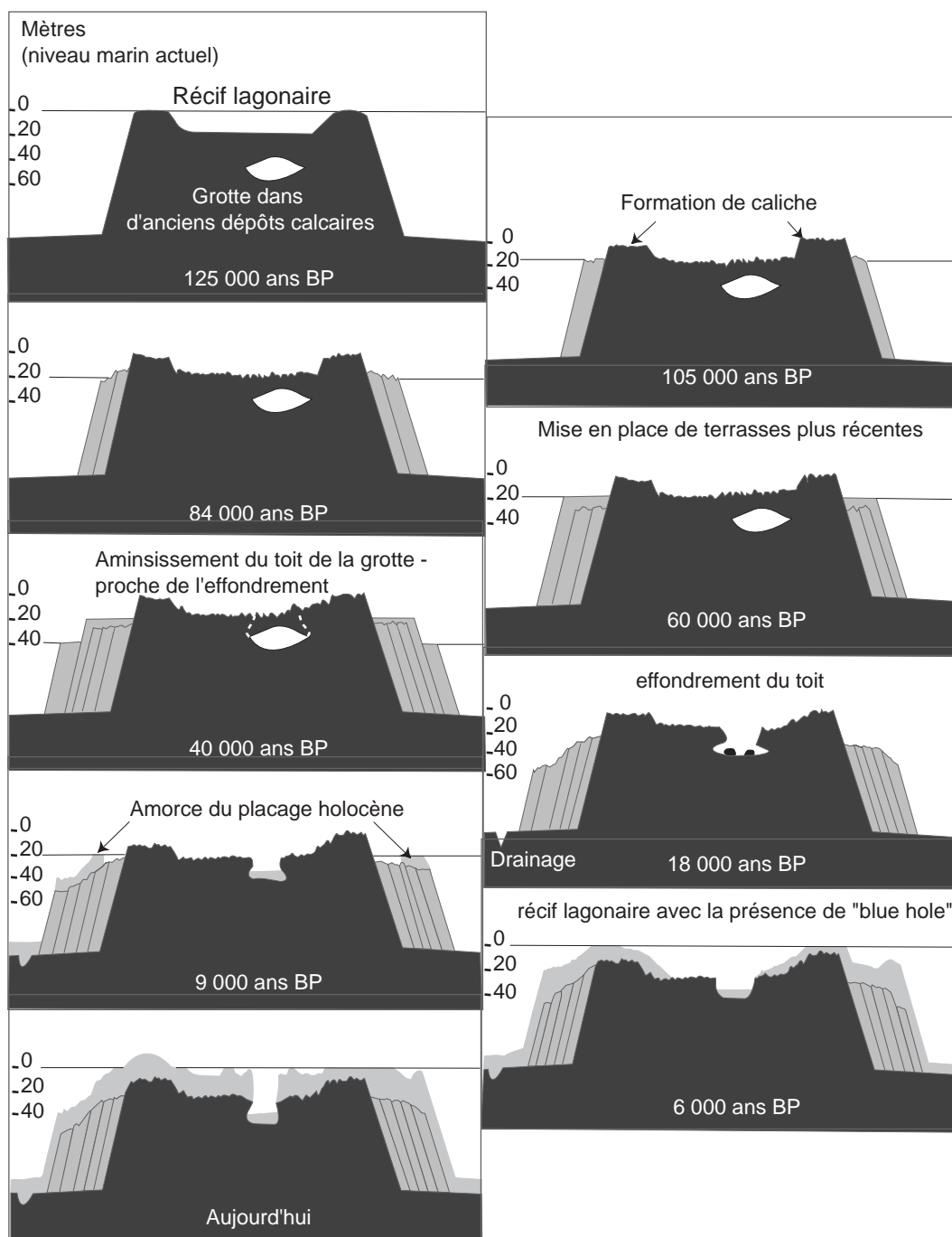
Lorsque l'implantation corallienne n'est pas maximale, la morphologie qui en résulte peut être différente suivant les degrés de colonisation. Lorsque la colonisation est un échec, le récif reste immergé et les fonds non colonisés sont sujets à l'érosion. Dans le cas d'une colonisation ponctuelle de la plate-forme, les larges atolls initiaux se fragmentent pour créer de petits atolls qui évoluent en récifs à pinacles dans le cas d'une survie corallienne isolée ou sont totalement immergés puis balayés par les vagues océaniques qui mettent en mouvement les sédiments meubles vers les zones profondes.

Ainsi, entre le Dernier Interglaciaire et la transgression post-glaciaire, on a vu se développer progressivement une période de glaciation qui s'est étendue de 80 000 BP à 10 000 BP, avec un maximum situé entre 21 000 et 18 000 BP. Les analyses paléorécifales montrent en fait que cette période a été affectée par deux glaciations distinctes dont la dernière a été marquée par le plus bas niveau marin connu jamais atteint.

On peut donc interpréter les plates-formes actuelles composant la ride Laccadives-Maldives-Chagos comme les formes héritées et survivantes d'une ancienne plate-forme plus vaste isolant des morphologies karstiques encore visibles à l'heure actuelle. Dans cette perspective, Stoddart envisage que les Chagos, qui sont situés à une profondeur modérée, ne sont que les héritages d'un atoll beaucoup plus vaste actuellement submergé ayant une forme subcirculaire avec un diamètre compris entre 100-150 km.

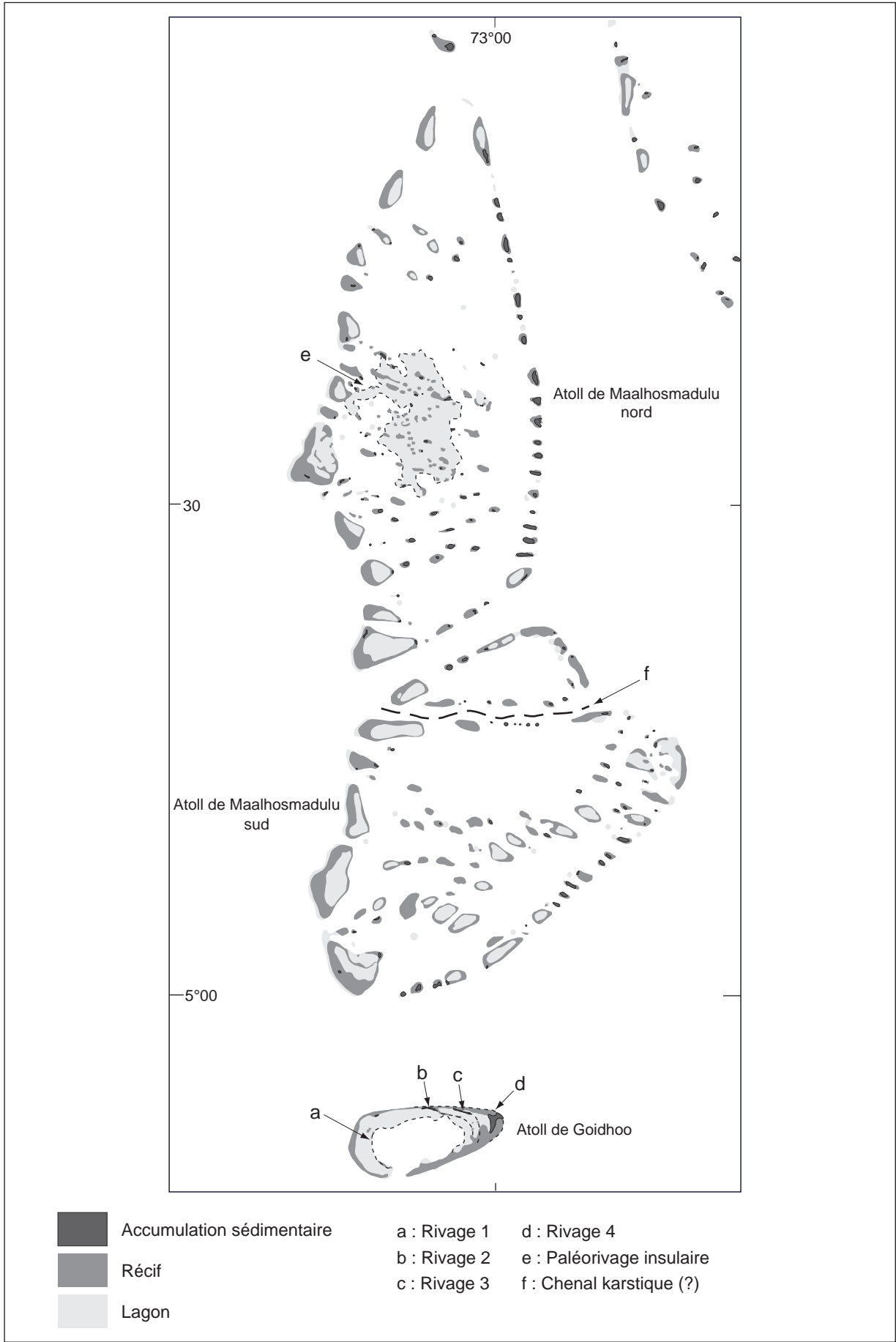
Comme nous l'avons vu précédemment, les plates-formes carbonatées de l'archipel des Maldives ont été exondées à plusieurs reprises et sur des échelles de temps plus ou moins importantes. Elles ont été soumises à des précipitations atmosphériques nouvelles qui ont permis l'implantation de lentilles d'eau douce dans les sédiments nouvellement émergés. C'est au cours de ces périodes de glaciation que nous supposons que certains bancs coralliens localisés dans l'archipel se sont mis en place, témoins de niveaux marins antérieurs. Il s'agit, par exemple, de l'atoll de Goidhoo, de la plate-forme centrale ouest de l'atoll de Maalosmadulu nord (cf. Figure 64). Toutefois, étant donné la latitude des

Figure 62 : Evolution d'un atoll du Dernier Interglaciaire à l'Holocène



d'après Hopley D., 1982

Figure 64 : Hypothèses morphologiques durant le dernier maximum glaciaire



Maldives, il est vraisemblable que les peuplements coralliens ont toujours existé, même durant les plus bas niveaux.

Comme pour la Barbade (Bard E. *et al.*, 1990), on retrouve les traces d'un ancien niveau marin à $-130 \text{ m} \pm 10 \text{ m}$ (Anderson R. C., 1998) dans l'archipel des Maldives. Sur les 18 sites identifiés par Anderson, la base de l'escarpement se situe à -130 m .

Ces bas niveaux marins ont été également identifiés dans d'autres archipels du Pacifique, comme celui d'Hawaï, avec un niveau à $-110/-120 \text{ m}$ dans l'île d'Oahu et $-160/-170 \text{ m}$ dans l'île d'Hawaï, bien que, dans ce cas, il s'agisse de variations volcano-isostatiques locales non représentatives à l'échelle globale. Des recherches récentes ont mise en évidence un niveau encore plus bas dans le Pacifique, situé entre -135 m et -143 m (Camoïn G.F. *et al.*, 2001), tandis que, dans les îles occidentales de l'océan Indien, le paléo-niveau marin présent entre 18 000 BP et 17 000 BP a été identifié à $-110/-115 \text{ m}$ (Camoïn G.F. *et al.*, 2004).

3.3.3. La remontée postglaciaire

Les variations au cours de l'Holocène ont pu être établies à partir d'études réalisées sur les récifs coralliens de provinces beaucoup plus nombreuses qu'au cours du Dernier Interglaciaire. Si certains (Vanney J-R., 2002) estiment que les courbes globales de remontées des océans depuis 20 000 BP indiquent une élévation moyenne estimée entre 1 et 1,5 mm/an, les analyses paléorécifales suggèrent des valeurs beaucoup plus importantes. En effet, entre 20 000 BP et l'Optimum Climatique, l'élévation aurait été comprise entre 5 et 10 mm/an avec des vitesses extrêmement rapides pouvant aller jusqu'à 50 mm/an.

L'élévation du niveau de la mer a permis, dans l'archipel des Maldives, la recolonisation des espèces coralliennes et la restauration d'atolls sur le récif fossile héritée de l'émersion würmienne. Il s'agit alors de la mise en place du paysage marin actuel jusque là subaérien.

Pour cela, la recolonisation des structures est nécessaire et dépend de plusieurs facteurs comme le nombre d'espèces ou d'individus ayant survécu à l'émersion, bien que toutes les espèces coralliennes semblent avoir survécu au dernier cycle glaciaire, la direction des courants transportant les larves d'organismes constructeurs, la lithologie, la morphologie héritée du plancher (Ciarapica G. et Passeri L., 1993) ainsi que les changements dans les conditions écologiques, la compétition biologique des espèces...

La remontée postglaciaire s'est traduite par une élévation de 120 à 150 m du niveau océanique entre - 18 000 et - 5 000 BP selon une vitesse estimée entre 10 et 40 mm/an⁻¹ ((Bard E. *et al.*, 1990 ; Bard E. *et al.*, 1996)). Pour G. Ciarapica et L. Passeri (1993), la vitesse de remontée holocène du niveau de la mer dans l'archipel des Maldives a été également légèrement supérieure à 10 mm/an.

Pour éviter son ennoïement, le récif a dû, durant cette période, croître *a minima* aussi rapidement que la somme de la subsidence des édifices et de la vitesse de la transgression. Toutefois, il ne faut oublier que le noyau pléistocène érodé assure un suivi rapide de la remontée par les coraux, sans qu'il y ait une véritable croissance de la trame récifale. La véritable croissance a alors débuté lorsque la vitesse de remontée a commencé à diminuer.

Il a été mis en évidence, d'après des analyses effectuées sur les coraux de la Barbade, que la dernière déglaciation a débuté 3 000 ans avant ce qui est théoriquement annoncé (Bard E. *et al.*, 1990). En effet, il a été observé deux poussées d'eaux de fonte (*meltwater pulse*) vers 14 000 BP et 11 000 (11 300 BP) dont la dernière correspond à une très brusque augmentation du niveau des océans d'environ 25 m en seulement quelques siècles. Le hiatus, vers 14 000 BP a été mis en évidence sur les récifs de Tahiti, de Nouvelle-Calédonie (Bard E. *et al.*, 1996 ; Montaggioni L.F. *et al.*, 1997) et de la Barbade où E. Bard *et al.* (1990) ont estimé la vitesse d'élévation du niveau de la mer à environ 40 mm/an⁻¹ vers 13 500 BP. Au cours de cette remontée, un premier arrêt, daté à 13 600 BP, a été individualisé vers - 90 m et le récif submergé subséquent datant de 13 500 BP correspond à la poussée des eaux de fonte répertorié sous le sigle MWP-1A (Bard E. *et al.*, 1996).

Entre 12 700 BP et 11 600 BP, Camoin G.F. *et al* (2004) signalent que le niveau marin situé vers - 60 m a effectué un arrêt, ou du moins a subi un ralentissement, dans la remontée qui est partiellement attribué à la période du *Younger Dryas*. Cette observation a été également faite par Bard E. *et al.* (1990) pour le récif de La Barbade et par Bard E. *et al.* (1996) pour celui de Tahiti. Cette terrasse récifale identifiée entre - 65 m et - 55 m sur le récif de Mayotte et sur le récif de Tuléar (Weydert P., 1974) est assez proche du niveau identifié à - 62 m (9 840 ± 250 BP) sur le récif des Seychelles (Badyukov *et al.*, 1989, in (Camoin G.F. *et al.*, 2004) et pourrait être rapproché également du niveau marin identifié aux Maldives à - 55 m. Bien qu'il y ait eu quelques avancées rapides dans l'élévation du niveau de la mer, notamment entre 11 950 BP et 11 350 BP, il y a peu de preuves pour supporter une nouvelle poussée des eaux de fonte identifiée par Bard *et al.* (1996) sous le sigle MWP-1B.

Comme semblent donc l'indiquer ces valeurs mondiales, la remontée du niveau de la mer s'est faite par paliers successifs et suivant des vitesses d'élévation différentes pouvant être supérieures à 10 mm/an comme, par exemple, dans l'île de Mayotte où les forages ont révélé une élévation du niveau de la mer entre le niveau - 60 m et - 37 m à 11,5 mm/an⁻¹, entre 11 600 BP et 9 640 BP (Zinke J. *et al.*, 2003).

Entre 10 000 BP et 7 250 BP, une élévation rapide du niveau de la mer a été identifiée par G.F. Camoin *et al.* (2004), entre 5,4 mm/an et 6 mm/an⁻¹. Durant cette période, la croissance récifale a été la plus active avec, dans l'atoll de Tarawa, une croissance estimée à 5 mm/an (Marshall J.F. et Jacobson G., 1985), alors que, dans les récifs du sud-ouest de l'océan Indien, de Mururoa et de Tahiti, les vitesses d'accrétion corallienne sont comprises entre 0,9 et 7 mm/an⁻¹. Durant cette phase, vers 9

100 BP, on estime le niveau de la mer à $-22 \text{ m} \pm 3 \text{ m}$. Ce niveau marin correspond à l'encoche mondiale identifiée à 24 m de profondeur. Difficilement visible dans l'archipel des Maldives, du fait d'une croissance corallienne importante, elle est clairement identifiable sur certains thilas (cf. 3.2.1.1.).

Pour G.F. Camoin *et al.* (2004), les récifs actuels ont justement débuté leur croissance vers 9 000 – 8000 BP.

D'une manière générale, ils se situent dans l'océan Indien entre -5 m et -30 m et correspondent à des morphologies édifiées aux environs de 9 000 BP. Aux Maldives, l'épaisseur des dépôts pré-holocènes des structures récifales reste inconnue jusqu'à environ -20 m . Dans l'archipel des Tuvalu, les récifs holocènes ont donc crû sur un substrat calcaire dégradé datant du Pléistocène situé entre -12 m et -15 m sous le niveau actuel juste après 8 000 BP (Dickinson W.R., 1999 ; 2004). Dans l'atoll de Tarawa, on identifie la structure pré-holocène entre -11 m et -17 m de profondeur sous les îles actuelles (Marshall et Jacobsen, 1985 *in* (McLean R.F. et Hosking P.L., 1991), bien que, pour C.D. Woodroffe et R.F. McLean (1992), la profondeur minimale soit plutôt située autour de -8 m . Les datations radiométriques de l'archipel des Kiribati le confirment. La croissance récifale holocène a débuté il y a 8 000 BP avec une vitesse comprise entre 0,5 et 0,8 mm/an pour la période 8 000 BP et 6 000 BP. En Nouvelle-Calédonie, la colonisation corallienne des substrats pré-holocènes frangeants est plus tardive (postérieure à 7 000 ans BP), en comparaison avec la plupart des sites récifaux régionaux. Elle a été, par ailleurs, retardée sur les côtes nord, probablement à cause de la nature des substrats et des conditions hydrodynamiques locales, plus ou moins favorables au recrutement larvaire. Cette surface a pu être également identifiée dans d'autres atolls comme, par exemple, dans l'atoll d'Eniwetok entre -7 m et -14 m et entre -8 m et -12 m dans l'archipel des Cocos. Il y a donc eu une certaine uniformité à l'échelle de la région indo-pacifique dans la restauration des récifs.

Cette période correspond donc à la phase terminale de la déglaciation qui a été suivie par une inflexion très nette des courbes vers 7 500 et 7 000 BP, que G.F. Camoin *et al.* (2004) ont mesurée à 1,1 mm/an⁻¹. Ce ralentissement a été mis en évidence par P. Blanchon *et al.* (2002) sur le récif du Grand Cayman, et a été supposé sur le récif de Tahiti (Montaggioni L.F. *et al.*, 1997 ; Cabioch G. *et al.*, 1999).

A partir de 7 000 BP, des auteurs (Camoin G.F. et Montagnioni L.F., 1995) établissent que « le niveau de la mer est remonté de 20 m en moins de 2 000 ans » ; ou « d'environ 25 mètres en seulement quelques siècles » (Bard E. *et al.*, 1996). Ces observations ont été également faites sur les récifs des îles Maurice, Réunion et Mayotte (Colonna M., 1996 ; Colonna M. *et al.*, 1996 ; Camoin G.F. *et al.*, 1997).

Pourtant, au cours de cette remontée, le niveau de la mer semble avoir stationné suffisamment longtemps pour permettre l'édification d'encoches supérieures. En effet, leur présence vers -18 m et -7 m tend à nous confirmer des arrêts dans la remontée. Une fois encore, il ne s'agit pas d'observations locales, mais de témoins sous-marins observés dans des récifs mondiaux. Toutefois, nous pouvons

nous interroger sur l'absence de ces nouveaux jalons dans les calculs de remontée des paléorécifaux ou dans l'histoire des variations eustatiques à l'échelle mondiale ?

La période a été de nouveau suivie par un ralentissement de l'élévation du niveau de la mer située à 1,7 mm/an (Colonna M., 1996) et une diminution de la croissance récifale entre 1-1,5 mm/an⁻¹ (Camoin G.F. *et al.*, 2004) jusqu'à atteindre sa cote actuelle vers 3 000-2 000 BP. Ces courbes holocènes des récifs de la partie sud-occidentale de l'océan Indien « présentent des similitudes avec les courbes de remontée du niveau marin déduites des études sur les Caraïbes » (Colonna M. *et al.*, 1996).

La rapide remontée postglaciaire a permis le développement dans les mers tropicales d'au moins trois générations récifales situées entre - 140 m et - 10 m, ayant été édifiées entre 18 000 BP et 14 700 BP, 13 800 BP et 11 500 BP et depuis 10 000 BP (Montaggioni L.F., 2000), avec des vitesses d'édification différentes pour chaque stade.

Suivant les récifs, la croissance récifale holocène a suivi l'élévation du niveau de la mer ou s'est faite en décalage par rapport à elle, notamment pour les récifs australiens, pacifiques et indiens (Woodroffe C.D., 1989, 1992 ; Woodroffe C.D. et Mclean R.F., 1994 ; Woodroffe C.D. *et al.*, 1994 ; Woodroffe C.D. *et al.*, 1999). Ainsi, aux Maldives, C.D. Woodroffe (1992) estime que le récif a développé une stratégie de croissance décalée afin de rattraper le niveau de la mer. Pourtant, les témoins morphologiques que nous avons observés ne nous laissent pas envisager une telle origine. En effet, les encoches, les grottes, les morphologies karstiques semblent montrer que le récif a crû en même temps que le niveau de la mer et qu'il s'est développé à partir d'une structure pré-holocène sous jacente (I.N.Q.U.A., 2000 ; Mörner N-A. *et al.*, 2004).

Durant les 100 000 ans qu'il a fallu au niveau marin pour arriver au stade actuel, l'atoll a dû subsider graduellement d'environ 0,1 mm/an, au point de retrouver l'ancien niveau d'érosion subaérienne à 10-20 m en dessous du niveau corallien actuel.

La croissance récifale a pu être plus ou moins rapide selon les lieux géographiques, puisqu'il s'avère qu'elle a été légèrement supérieure dans l'océan Indien à ce qu'elle a été dans l'océan Pacifique : la croissance des récifs coralliens a pu compenser la vitesse moyenne de remontée du niveau marin au cours de la période 0-14 000 BP. Les phénomènes d'enneigement de récifs se sont limités à la phase de débâcle glaciaire MWP-1A, et plus particulièrement sur le récif de Mayotte.

Les différences entre les grandes provinces récifales d'une part, et entre les courbes de variations du niveau marin établies dans différents secteurs de la province indo-pacifique, d'autre part, impliquent l'intervention de mécanismes de compensation hydro-isostatique et de redistribution des masses d'eaux lors de la dernière déglaciation.

Si les différents auteurs s'accordent sur une remontée post-glaciaire du niveau de la mer, ils n'envisagent pas des arrêts suffisamment longs au cours desquels des encoches auraient pu se créer.

Les observations paléoenvironnementales faites dans l'archipel des Maldives témoignent pourtant de nouveaux jalons dans l'évolution postglaciaire du niveau marin. Ces derniers identifiés aux profondeurs de - 55 m \pm 5m, - 35 m \pm 5m, - 25 m, - 18 m (cf. Figure 65) et - 5 m correspondent aux références paléobathymétriques exposées précédemment.

Les encoches, les grottes et les terrasses identifiées durant les plongées sous-marines nous ont servi d'indicateurs et permettent de témoigner des périodes de relative stabilité du niveau marin dans ses phases de remontée, par l'érosion des complexes récifaux pré-holocènes. Ces morphologies observées aux mêmes profondeurs sur de nombreux tombants océaniques pourraient nous laisser entrevoir une certaine unité dans la remontée postglaciaire au cours de laquelle le niveau marin a effectué des arrêts suffisamment longs afin de laisser les traces de paléo-rivages (Collina-Girard J., 1998, 1999 ; Laborel J. *et al.*, 1999 ; Collina-Girard J., 2002). D'après les modèles de constructions récifales établis sur les récifs de Tahiti, Mayotte, la Barbade..., qui révèlent des vitesses d'édifications déjà très rapides, il faut imaginer qu'après de tels stationnements, que nous estimons avoir duré *a minima* 2 000 ans, leur croissance a été encore plus rapide, montrant clairement la faculté d'adaptation des récifs face à une remontée rapide du niveau de la mer.

D'après la morphologie des pentes externes récifales, les vitesses d'édification apparaissent comme différentes avant puis après les stationnements marins. En effet, la pente du récif est plus douce avant l'encoche qu'après (cf. Figure 65), ce qui tendrait à montrer que la remontée du niveau de la mer a été brutale et rapide, juste après le stationnement. Ce sont peut-être ces reprises brutales dans la remontée qui ont pu inonder les plaines littorales et marquer les mémoires collectives (jusqu'à entretenir le mythe du Déluge).

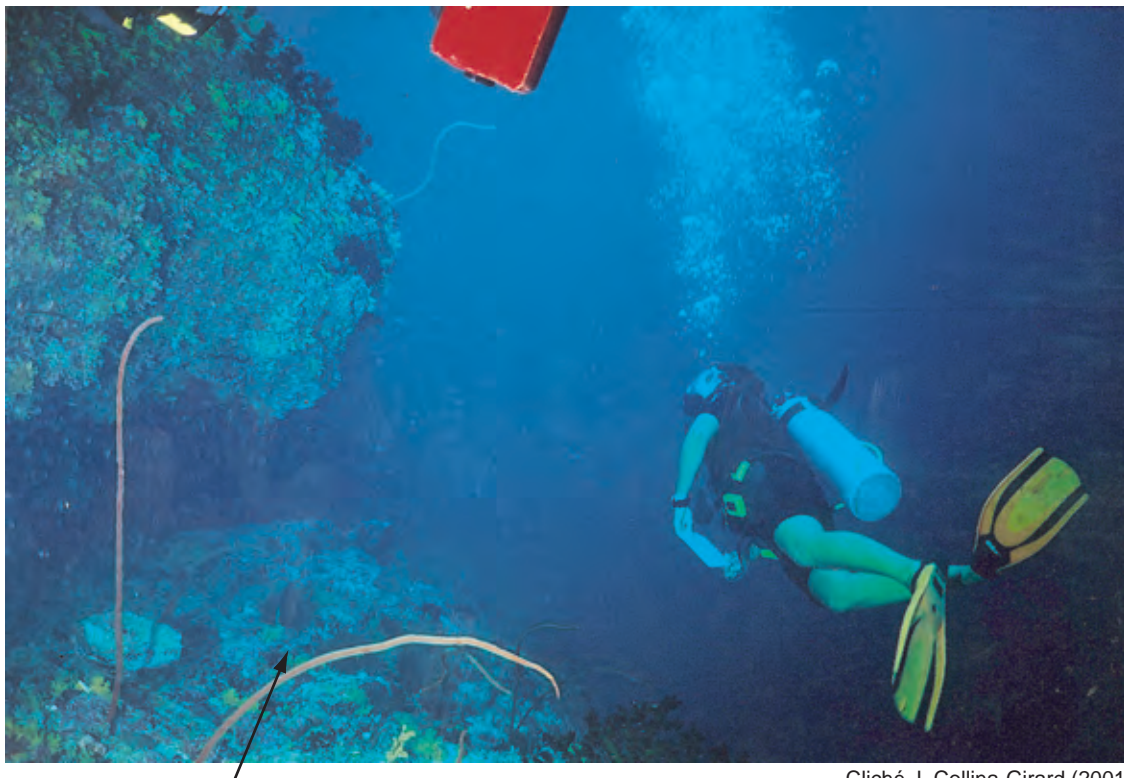
L'analyse des comportements paléo-écologiques et sédimentologiques des récifs au travers des descriptions morphologiques peut donc nous renseigner sur le comportement de croissance des récifs coralliens lors d'une phase de remontée du niveau marin. Toutefois, au-delà de la description naturaliste, il est essentiel d'avoir des données scientifiques chiffrées que nous n'avons pu obtenir car les analyses menées en laboratoire ne sont pas encore terminées.

3.3.4. L'Optimum Climatique

Toutes les courbes actuelles montrent clairement qu'il a existé à partir de 6 000 – 5 000 BP, une élévation globale du niveau de la mer correspondant à la fonte des glaciers continentaux due à une augmentation estimée des températures entre 2 et 3 °C supérieures à l'actuelle (Leroux M., 2000) . Cette élévation a été identifiée par les répercussions qu'elle a eues sur le mouvement de la Terre (Mörner N-A., 2004) : le rayon du géoïde a très légèrement augmenté et cette augmentation a été

Figure 65 : Encoches sous-marines à - 18 m

Dans l'atoll de Maalhosmadulu sud

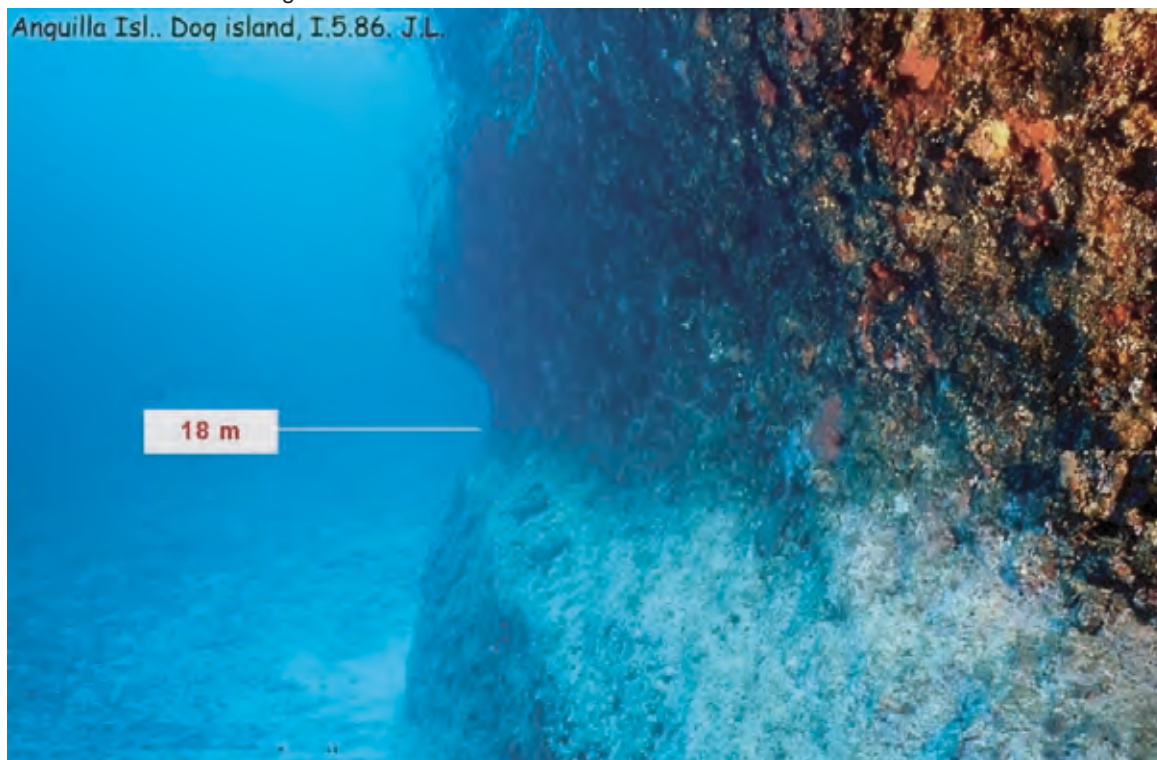


Cliché J. Collina-Girard (2001)

Accumulations d'éléments détritiques sur le plancher de l'encoche qu'ils tendent à combler.

Dans le récif de l'île d'Antigua

Anquilla Isl., Doq island, I.5.86. J.L.



Cliché J. Laborel

Noter la verticalité de la construction récifale après le paléo stationnement marin.

compensée par une décélération générale du mouvement terrestre. L'auteur a identifié trois phases caractéristiques au cours des derniers 30 000 ans.

Tableau 3 : Relations entre les changements eustatiques et la vitesse de rotation de la Terre (*d'après N.-A. Mörner, 2004*)

Episode	1	2	3
Niveau marin	Baisse	Elévation	Redistribution des masses d'eau
Rotation de la Terre	Accélération	Décélération	Changement d'angle
Age en BP	30 000 – 20 000	20 000 – 5 000	Depuis 6 000 - 5000

La littérature scientifique abonde de références géographiques concernant l'existence d'un haut niveau marin holocène à partir de 6 000 BP. Dans son ouvrage de 1991, P.A. Pirazzoli répertorie des morphologies de haut niveau marin à travers le monde, notamment aux basses latitudes des principales masses océaniques alors qu'il est absent en Méditerranée, qu'il identifie à + 1/+ 2 m au-dessus du niveau actuel, entre 6 000 et 2 000 ans BP, avant de reconsidérer en 1996, que ce niveau est situé à + 2/+ 4 m entre 6 000 et 5 000 BP. D'après Mörner (2004), vers 6 000 ans BP, le niveau marin se situe légèrement plus haut que le niveau actuel, à environ + 1 m, alors que nous l'avions (I.N.Q.U.A., 2000) supposé entre + 60 cm et + 1 m par rapport au niveau actuel.

Ces variations légères du niveau marin ont été ainsi observées dans 12 atolls du Pacifique situées entre + 0,8/+ 1 m entre 5 000 et 1 250 BP (Pirazzoli P.A. *et al.*, 1988) sans jamais s'être abaissées au-dessous de + 0,7 m.

Les travaux effectués dans d'autres îles, localisées dans la zone intertropicale (Bourrouilh - Le Jan F.G., 1990), mettent en évidence l'existence d'un niveau marin mi-holocène supérieur au niveau actuel de + 2/+ 3 m. C'est, par exemple, le cas pour l'île de Maré, les îles de Mataïva, Tikehau, Rangiroa dans l'archipel des Tuamotus ainsi que la plate-forme carbonatée des Bahamas. Il existe de nombreux sites avec des témoins de fluctuations positives de faible ampleur des eaux océaniques, aux alentours de + 1 m datés entre 4 500 et 1 500 ans (Pirazzoli P.A. *et al.*, 1985 ; Pirazzoli P.A. *et al.*, 1987).

Des recherches menées dans l'archipel des Seychelles (Korotky, Razjigaeva, Kovalukh, 1990) ont également permis de mettre en évidence un niveau mi-holocène à + 2,5/+ 3 m au-dessus du niveau marin actuel, qui a été daté aux alentours de 6 000-5 000 BP, et qui serait observable, selon les auteurs, dans tout l'océan Indien. Dans l'atoll de Farquhar (Seychelles), un niveau identifié à + 2 m a été daté à 3 640 BP (Battistini R., 1977), alors que, dans l'archipel des Cocos Keeling, une plate-forme conglomérée, au-dessus de la croissance corallienne actuelle, a été datée à environ 4 000 BP (Smithers S.G. et Woodroffe C.D., 2000). Ce haut niveau a été également mis en évidence sur un petit îlot de l'île d'Oahu (archipel des îles Hawaï) aux alentours de 2 m \pm 0,35 m (Grossman E.E. *et al.*, 1998).

Les courbes de remontée ont montré que la stabilisation du niveau marin a été décalée dans le temps, d'ouest en est dans les Caraïbes et la province indo-pacifique (Pirazzoli P.A., 1991 ; Grossman E.E. *et al.*, 1998). Le niveau marin a initialement touché les récifs des Caraïbes, vers 6 000 BP (Van Andel T. et Laborel J., 1964), la région Pacifique entre 6 000 - 4 000 ans BP, avant ceux de l'océan Indien vers 3 000-2 000 BP. Cette non-uniformité dans l'élévation du niveau marin sur l'ensemble des littoraux indo-pacifiques et caraïbes est certainement dues à la rigidité terrestre. Toutefois, des recherches sont actuellement en cours, avec les équipes de SUGUIO au Brésil et de Baker et Haworth en Australie, afin de vérifier ces observations.

D'après G.F. Camoin *et al.* (2004), ce haut niveau holocène pourrait refléter une réponse hydro-isostatique locale à l'augmentation postglaciaire du volume océanique. Cette évolution positive contemporaine du niveau relatif de la mer peut être liée soit à un phénomène géologique régional, soit à une modification particulière du géoïde à cette latitude.

Pour J.X. Mitrovica et G.A. Milne (2002), nous devons rechercher l'origine de ces hauts niveaux tardi-holocènes dans le rebond viscoélastique de la lithosphère au niveau de l'équateur, après la période glaciaire. Il s'agit du « *Equatorial ocean syphoning* » qui correspond à une déformation du géoïde du fait de la migration de matériel au sein du manteau durant la période interglaciaire, de la zone équatoriale, où il s'est accumulé suite à la pression exercée par les calottes glaciaires polaires, durant la glaciation, vers les hautes latitudes. Dans un contexte d'ajustement glacio-isostatique, ce processus est connu pour être la cause principale des changements du niveau de la mer dans les régions océaniques au-delà du bombement périphérique pléistocène des inlandsis au cours des derniers 4 000 ans, bien que quelques surcharges par des processus tectoniques ou une fonte mineure de petits glaciers soient possibles depuis la fin de l'Holocène (Mitrovica J.X. et Peltier W.R., 1991). Les hauts niveaux marins du dernier Holocène, d'environ 3 m d'amplitude, sont donc endémiques aux bassins de l'océan équatorial. Ils impliquent *a contrario* une baisse du niveau de la mer, continue et modérée (< à 1 mm/an⁻¹) dans les territoires couverts par la dernière glaciation pléistocène.

Pour certains chercheurs, toutefois, les observations menées sur différents sites n'ont pas révélé de façon flagrante la présence d'un haut niveau marin. Ainsi, la description de conglomérats de gros blocs, non datés, dans les archipels des Laccadives, des Chagos, ainsi que dans certains atolls maldiviens, comme les témoins d'un haut niveau holocène (Sewell R.B.S., 1932 ; Stoddart D.R., 1966, 1971), ou l'observation par Agassiz « sur l'île de Kunfunadhoo de la possible existence d'un haut niveau marin (...) entre 7 ou 8 m » (1903 *in* (Woodroffe C.D., 1992 ; Ali M., 2000) n'ont pas fait l'unanimité (Woodroffe C.D., 1992). Il serait alors intéressant d'envisager la position de ce haut niveau sur des côtes non sédimentaires proches de nos terrains d'étude. Dans le cas des Maldives, une analyse des variations eustatiques des côtes rocheuses du Sri Lanka serait à envisager. D'après les datations disponibles, effectués sur plusieurs échantillons des côtes sud-ouest et sud de l'île, il a été

révélé (Katupotha J. et Fujiwara K., 1988) qu'entre 6 170 (± 70)-5 100 (± 70) et 3 210 (± 70)-2 330 (± 60) BP, le niveau moyen de la mer était au moins un mètre au-dessus du niveau moyen actuel.

Dans les atolls de Tarawa et d'Abemama, dans l'archipel des Kiribati, il n'existe « aucun indice de récif ancien actuellement émergé et hors de sa position de croissance » (Guilcher A., 1967), soit parce qu'il n'a jamais existé, soit parce qu'il a été entièrement détruit par la corrosion. D'après R.F. McLean et P.L. Hosking (1991), l'archipel des Tuvalu ne semble pas avoir été atteint par un niveau marin supérieur à l'actuel durant l'Holocène. Pour d'autres (David et Sweet, 1904 ; Sollas, 1908 ; Cloud, 1952, *in* (Schofield J.C., 1977), ce haut niveau marin existe : ils en ont pour preuve les *Porites* retrouvés *in situ* et la mise en évidence d'une côte avec un faciès de haut niveau marin (cf. 3.2.1.3.). Ces observations ont été faites par d'autres scientifiques présents sur place lors de notre premier séjour dans l'archipel des Tuvalu en 1999 (Dickinson W.R., 1999). En effet, les travaux de W.R. Dickinson (1999) confirment la présence d'un haut niveau marin mi-holocène dans l'atoll de Funafuti, compris entre +2,2/+2,4 m par rapport au niveau marin actuel. W.R. Dickinson (2003) estime également que d'autres îles du Pacifique central ont été modelées par un haut niveau marin oscillant entre + 1,6/+ 2,6 m par rapport au niveau marin actuel. Des travaux effectués sur l'archipel fidjien voisin (Nunn P.D., 1994) confirment également une élévation à + 1,5 m vers 3 200 ans BP et considèrent à une échelle plus globale un niveau marin de +1/+2 m entre 4 000-2 000 ans BP (1995 ; 1998).

Ce niveau mi-holocène aurait duré, d'après les données paléorécifales existantes, jusqu'à 2 150 BP. Sa longévité apparaissant comme différente au sein de l'océan Pacifique où il se serait arrêté un millénaire plus tôt aux îles Mariannes, et entre 1 000-1 200 ans avant notre ère aux Tuvalu, il semble qu'il ne s'agit pas d'une valeur unitaire à l'échelle de la communauté indo-pacifique. D'après la nouvelle courbe des variations du niveau de la mer dans l'archipel maldivien, ce haut niveau aurait atteint son maximum vers 3 900 BP, avec une élévation à +1,1/+1,2 m au-dessus du niveau actuel avant de se stabiliser vers 2 700 BP, puis d'osciller de nouveau positivement vers 1 000-800 BP. Comme, pour P.D. Nunn (1998), la période récente est effectivement marquée par des variations eustatiques qui ont modelé les morphologies actuelles de plusieurs îles du Pacifique, tectoniquement stables. Il s'agit du Petit Optimum Climatique (1 050-690 BP), avec un niveau marin supérieur de +0,9 m par rapport au niveau actuel vers la période transitoire (690-575 BP), où le niveau marin a débuté sa régression, du Petit Age Glaciaire entre 575-150 BP, où le niveau marin se situait à - 0,9 m par rapport au niveau actuel puis d'une période de réchauffement à partir de 150 BP, avec une remontée du niveau de la mer jusqu'au niveau actuel, voire légèrement supérieur. D'après K. Wyrski (1990) et P.D. Nunn (1998), la courbe du niveau de la mer sur les cent dernières années, pour le Pacifique, indique une montée estimée entre 1,0-1,5 mm/an.

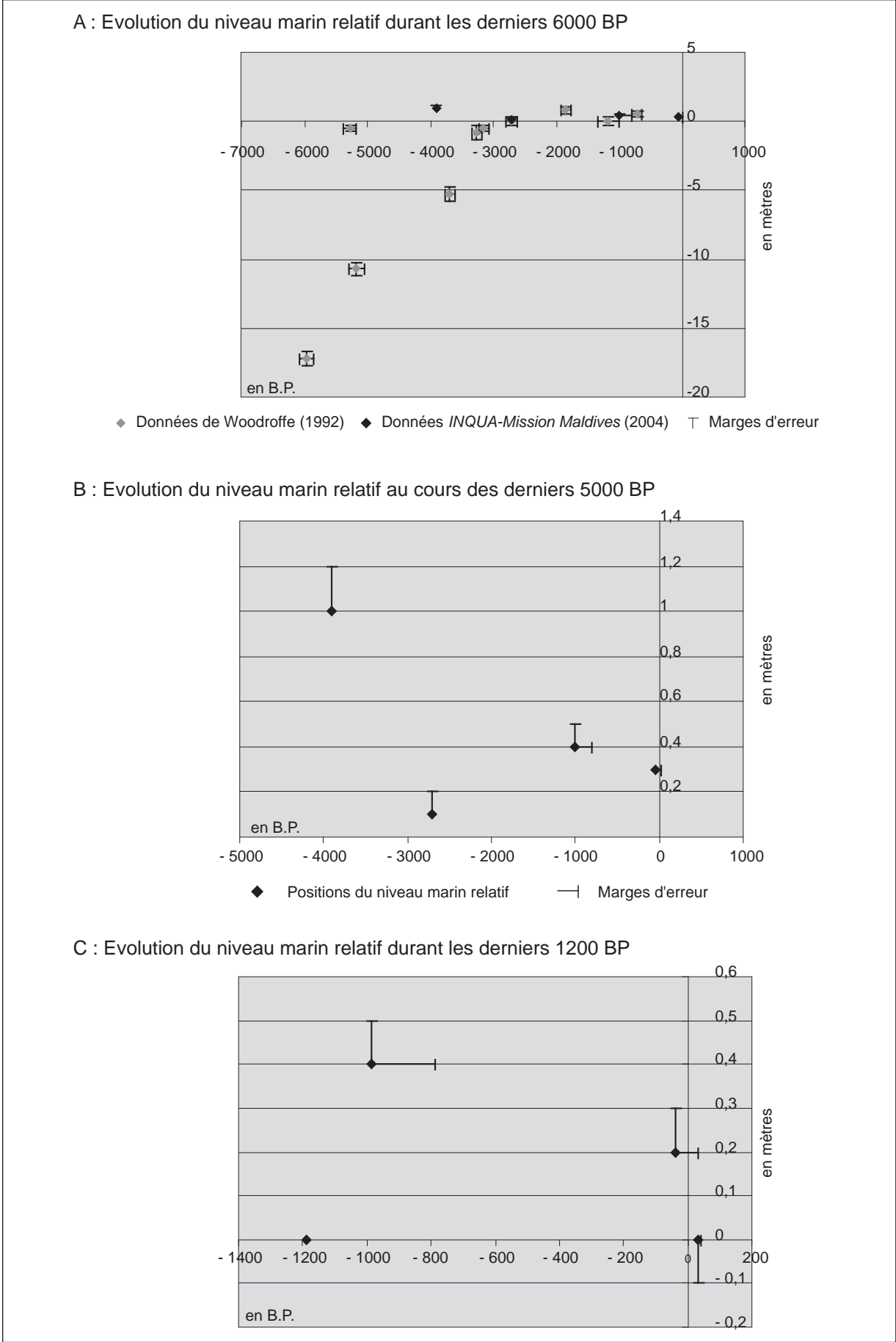
Les remarques faites par P.D. Nunn (1998) ont rejoint celles émises par l'INQUA (2000) et ont été confirmées par N-A. Mörner (2004). La découverte d'un corps humain dans un beach rock de l'île de Lhosfushi (Mörner N-A. et Tooley M.J., 2001), dans l'atoll de Malé sud, a permis de faire

ressortir une tendance positive de la courbe du niveau marin dans l'archipel des Maldives. Daté initialement à $1\,225 \pm 55$ BP puis aux alentours de 800 BP du fait de « corrections marines », ce niveau a donc connu une nouvelle élévation de + 50-60 cm par rapport au niveau actuel entre 1 000-800 BP (cf. Figure 66).

Au cours des 300 dernières années, le niveau relatif de la mer dans l'archipel des Maldives a de nouveau oscillé positivement avec une accélération entre 1890-1930 AD. Durant cette période, le niveau de la mer s'est élevé d'environ 1-1,1 mm/an. Toutefois, entre 1930 et 1950, le niveau de la mer s'est stabilisé (Pirazzoli P.A., 1989) et semble avoir baissé (Mörner N-A., 2004) et cela jusqu'au milieu des années 1960 AD. Quelles en sont les raisons ? S'agit-il de causes climatiques locales, de causes structurales liées à la subsidence ou au géoïde, de causes eustatiques mondiales... ? D'après N-A. Mörner (2000), l'océan Indien est victime d'une importante évaporation, réduisant son niveau moyen. Ainsi, l'augmentation de l'évaporation au niveau des Maldives, due à l'augmentation de la « mousson » du nord-est, a favorisé la baisse du niveau de la mer au cours du milieu du XX^e siècle (Mörner N-A. *et al.*, 2004). Pourtant, s'il s'agit d'une spécificité maldivienne, pourquoi la courbe de P.D. Nunn est-elle si proche de celle des Maldives ?

Une étude poussée des terrasses sous-marines, des encoches et des systèmes morphologiques sous-marins des Maldives pourrait améliorer la connaissance sur les fluctuations holocènes du niveau de la mer, et il conviendrait probablement d'envisager de nouvelles plongées pour repérer les encoches et de mener une étude détaillée d'un récif, comme par exemple, celui de Hulhudhoo (atoll de Maalhosmadulu sud, archipel des Maldives) qui associe grottes, encoches, racines fossiles, beach rock, sols pléistocène et holocène...

Figure 66 : Vers une nouvelle interprétation du niveau de la mer dans l'archipel des Maldives



Le chapitre introductif de cette première partie a été rédigé à partir de généralités, destinées à familiariser le lecteur avec les différentes formes constitutives d'un atoll. Les hypothèses développées ultérieurement à propos des différents ensembles géographiques étudiés ont été émises volontairement pour provoquer des prises de positions. De nombreuses incertitudes existent encore quant à la naissance et l'évolution des archipels maldivien et tuvaluan. Si certains considèrent une origine exclusivement karstique, d'autres envisagent une origine darwinienne pour la primo-structure suivie d'une évolution karstique superficielle durant les phases régressives eustatiques.

A la différence d'autres systèmes littoraux, les éléments sus-présentés ont une influence directe sur l'évolution des récifs et des accumulations sédimentaires car ils conditionnent l'ensemble des formes atolliennes, de la macroforme à l'échelle de l'archipel à la microforme à l'échelle d'un sol, et cela à des espaces de temps variés.

Les études bibliographiques et les observations menées sur le terrain, à différentes échelles temporelles, ont permis de montrer le rôle prépondérant des variations eustatiques dans la construction et l'évolution des paysages insulaires actuels de l'archipel des Maldives.

Les formes sous-marines individualisées entre - 5 m et - 55 m sur les pentes récifales des atolls coralliens ont permis de préciser non seulement l'évolution eustatique à l'échelle de l'archipel maldivien mais de l'appréhender à l'échelle mondiale. La remontée postglaciaire a subi des variations complexes avec des phases d'accélération, de ralentissement puis d'arrêt identifiées sur les récifs par des encoches, des grottes

L'approche naturaliste menée sur les témoins émergés a révélé la présence de hauts niveaux marins. Des analyses prochaines de ces témoins devraient nous révéler leur âge, soit pléistocène comme le pense Nils-Axel Mörner, soit holocène. L'étude de ces formes a guidé notre réflexion quant aux modalités d'adaptation d'un récif face à une élévation du niveau de la mer et aux modifications climatiques. Ce travail d'observatrice nous a permis d'affiner les connaissances eustatiques sur l'archipel des Maldives et d'en apporter de nouvelles.

DEUXIEME PARTIE

LES FACTEURS D'ÉVOLUTION INFLUENÇANT LES STRUCTURES ATOLLIENNES

Si le comportement eustatique postglaciaire et holocène ne semble jamais avoir menacé l'ensemble récifal, peut-on considérer qu'il en est de même pour les accumulations sédimentaires ? En effet, si leur évolution suit celle des atolls sur le long terme, elles peuvent être influencées par des agents extérieurs et cela à des échelles de temps beaucoup plus réduites. Se révèle alors le caractère éphémère et vulnérable des îles basses coralliennes dont il convient de mesurer l'évolution sur des périodes historiques récentes. Pour cela, nous avons souhaité évaluer la mobilité insulaire en utilisant différentes méthodes qui peuvent être critiquables mais qui conduisent à des amorces de réponses.

Ainsi, nous avons mené une réflexion sur le fonctionnement de deux îles, l'une naturelle et l'autre anthropisée, suivant les conditions météo-océaniques actuelles, afin d'en évaluer le comportement futur éventuel. Pour cela, nous avons envisagé l'avenir des îles et des archipels dans la perspective de changements climatiques. L'intérêt porté au fonctionnement morphosédimentaire de ces ensembles géographiques sous l'action de facteurs hydrodynamiques permet d'estimer les modifications qu'ils sont susceptibles de subir, en extrapolant les réactions qui ont été les leurs au cours des dernières décennies.

Travailler dans l'éventualité de modifications climato- et météo-océanique implique une connaissance actuelle de ces phénomènes et conduit à certaines interrogations. Peut-on déjà observer des modifications ? Quel est le rôle d'événements climatiques de grande ampleur comme El Niño ?

Chapitre 4 – Evolution des accumulations sédimentaires à différentes échelles de temps et d'espaces

Dans la perspective d'une élévation du niveau de la mer, les impacts seront plus importants pour des espaces insulaires réduits. Une île de petite taille possède proportionnellement un linéaire côtier bien développé et directement influencé par les conditions environnementales (Doumenge F., 1985)

4.1. Inventaire spatial des structures insulaires

De Martonne (*in* Le Grand Robert, 2001) écrivait que « seules les petites îles isolées méritent une mention spéciale dans l'étude des formes littorales, les grandes îles sont en réalité des continents réduits (...) ».

Il existe plusieurs échelles dans la classification insulaire. Pour A.C. Falkland (1992), le critère de différenciation est lié exclusivement à la taille. Ainsi, on distinguera parmi les îles océaniques les petites îles inférieures à 2 000 km² des très petites îles de moins de 100 km² et des micro-îles comme les îles maldiviennes qui ont des tailles variées, allant d'un minimum de 0,031 km² pour l'île de Maduvvari dans l'atoll de Mulaku à un maximum de 5,17 km² pour l'île de Gan dans l'atoll de Hadhdhunmathee.

Le recensement des surfaces des îles habitées donne les résultats suivants :

- 17 inférieures à 0,10 km²,
- 64 entre 0,10 et 0,24 km²,
- 62 entre 0,25 et 0,49 km²,
- 28 entre 0,50 et 0,99 km²,
- 26 entre 1 et 2,99 km²,
- 3 supérieures ou égales à 3 km².

Cette distinction dans la taille des îles n'a malheureusement pas pu être réalisée pour les îles inhabitées, faute de documents précis.

F. Doumenge (1985) s'est intéressé à des approches plus typologiques en fonction du degré d'isolement et de l'insularité. A ce titre, les archipels étudiés seront considérés comme « supra-insulaires » car plus l'île est isolée plus son insularité est exacerbée. L'auteur parle d'îles extrêmement isolées pour les Tuvalu, et de territoires archipélagiques dispersés à îles isolées pour les Maldives. Cette caractéristique est complétée par le rapport entre le trait de côte et la surface qu'il définit comme « l'indice côtier ». « Plus le rapport est élevé, plus l'impact du système littoral sur l'ensemble insulaire est significatif » (Brigand L., 2000). Ceci concerne particulièrement nos archipels car « le cas limite

est celui de l'atoll où le rivage de l'île est dédoublé en une côte externe sur l'océan et une côte interne sur le lagon » (Doumenge F., 1985).

Les territoires insulaires que nous étudions sont compliqués par la présence d'îles au sein d'atolls, comme dans le cas des Tuvalu ou d'atolls au sein d'atolls comme dans le cas des Maldives. S'il est indéniable que ce sont des archipels supra-insulaires, la variété et le nombre d'îles au sein des Maldives nécessitent que nous nous interroguions sur les critères de leur classification.

D'après le Grand Robert²⁶, une île est « une étendue de terre ferme émergée de manière durable dans les eaux d'un océan, d'une mer, d'un lac ou d'un cours d'eau ». Quemada (1994 *in* (Brigand L., 2000)) affine la définition en y introduisant des données plus physiques. Il s'agit « ...d'une étendue de terre de superficie très variable. Cette superficie doit être suffisamment petite pour que le climat qui y règne soit entièrement soumis à l'influence marine. Aucun caractère vraiment spécifique ne différencie les petites îles des îlots ou des îlets, seule la coutume semble leur attribuer l'un de ces termes en particulier. S'il s'agit de simples affleurements rocheux, on parle d'écueils ou de récifs ». Pour les îles coralliennes des archipels atolliens, on peut préciser la définition en y introduisant les notions associées de récif et de platier récifal car, sans eux, l'île ne peut exister. Ils lui apportent les matériaux nécessaires à sa construction, et lui assurent une protection et une certaine stabilité dans l'évolution. D'après J.S. Gardiner (1903), ces îles se localisent plutôt sur les petites structures lagonaires que sur les grandes. Si les atolls de l'océan Pacifique possèdent des îles sur leurs bordures, elles sont quasiment inexistantes dans le lagon.

Dans le Grand Robert, l'îlot correspond quant à lui à « un petit espace isolé dans un ensemble d'une autre nature (qui est souvent comparé à la mer, à l'océan) ».

L'archipel des Tuvalu comprend 126 îles réparties sur 9 atolls ou bancs récifaux. Le nombre est plus incertain lorsque l'on aborde l'archipel maldivien, bien que la traduction du mot « *maldiv* », qui signifie le « royaume des milles îles » implique un nombre largement supérieur. Suivant les auteurs et les époques, le nombre d'îles a oscillé entre 100 et 12 700, le sultan Ibrahim, roi des Maldives au XVII^e siècle, se faisait appeler le « sultan des treize provinces et des douze mille îles »²⁷. A cette époque, la délimitation des provinces administratives était différente de l'actuelle. En effet, on trouvait respectivement du nord au sud : (1) Tilla dou matis (Thiladhunmathee), (2) Milla dou madoue (Miladhunmadulu), (3) Padypolo (Faadhippolhu), (4) Malos madou (Maalhosmadulu), (5) Ariatollon (Ari), (6) Malé atollon (Malé), (7) Poulisdous (Felidhoo), (8) Molucque (Mulako), (9) Nillandus (Nilandhoo), (10) Collo madous (Kolhumadulu), (11) Addou matis (Hadhthummathee), (12) Souadou (Huvadhoo), (13) Addou et Poue molucque (Addu et Fuamulaku).

²⁶ Le Grand Robert, 2001

²⁷ *Sultan Ibrahim dolos assa ral tera atholon*

Tableau 4 : Evolution du nombre d'îles dans l'archipel des Maldives référencées dans les ouvrages

Epoque	Nombre d'îles	Auteur
II siècle AD ²⁸	1 368	Ptolémée
Fin du IV siècle AD	1 370	Pape d'Alexandrie
412-414 AD	100	Fa Hsien
~ 430 AD	1 000	Hieronymus Palladius
?	1 000	Scholasticus
535 AD	multitude	Kosmas Indicopleustes
851 AD	1 900	Sulaiman
916 AD	1 900	Al-Mas-udhi
1017 AD	12 000	Rajaraja Cola
1254-1324	12 700	Marco Polo
1292-1293	12 000	John de Montecorvino
1304-1369	2 000	Ibn Battûta
1330	Entre 10 000 et 12 000	Friar Jordanus
1497	7 000 – 8 000	Hieronymo di Santa Stefano
1505	12 000 dont 8 000 sont habitées	Court de Justice Portugaise
1549-1600	11 000	Le Père Lucena
XVIème	12 000	Duarte Barbosa
XVIème	11 000	Alfonso D'Albuquerque
1602-1607	12 000 dont 175 habitées	Pyrard de Laval
XVIIème	12 000	Sultan Ibrahim
?	12 000	Capitaine Owen
XIXe	602	Colonel Yule
?	11 000 dont 2 000 sont habitées	Dyve
?	3 000	Ma Huan
1965	1 087 dont 210 habitées	Journal maldivien « <i>Viyafaari Miyadhuf</i> »
1969	1 100	Royal Air Force
1977	1 302 dont 202 habitées	Recensement de la population
1980	1 122	Livre annuel de statistiques
1981-1982	1 302	Livre annuel de statistiques
1983	1 390 dont 200 habitées	Journal maldivien « Haveeru »
1983-1984	1 302 dont 202 habitées	Livre annuel de statistiques
1985-1986-1987	1 190 dont 202 habitées	Livres annuels de statistiques
1988	1 300	IUCN-UNEP
1992	1 063	Ministère de l'Environnement
1993	1 192 dont 199 habitées	Livre annuel de statistiques
2004	1 087 dont 210 habitées	Encyclopaedia Britannica

²⁸ Après Jésus Christ

2004	1 098	(Admiralty survey.,1992), (Godfrey T., 1999), (Rufin-Soler C., 2004)
------	-------	--

Ce nombre extrêmement fluctuant peut être attribué aux caractéristiques de la formation des îles sous ces latitudes ainsi qu'à la définition de ces dernières. Ainsi, pour certains auteurs, l'île est considérée comme telle dès qu'elle est végétalisée, ce qui lui apporte une certaine stabilité, alors que, pour d'autres, la seule présence d'une accumulation sédimentaire émergée lui permet d'être répertoriée comme telle. Au-delà de ces caractéristiques, il existe des différenciations morphologiques introduites par la langue dhivehi. Il est alors aisé d'identifier à partir d'une carte les types d'îles, bien que certaines d'entre elles ne correspondent plus à leur morphologie initiale. Ainsi, on trouve les termes *fushi* et *dhiv* qui désignent des îles sableuses végétalisées. *Rah*, a une double signification car il s'agit à la fois d'une large île sableuse couverte d'une végétation mature, ou d'un village. *Huraa* est une île-village végétalisée composée d'éléments plus grossiers de type galets ou gros blocs. Quant aux îles non végétalisées, le terme de *finolhu* traduit une accumulation sableuse composée d'éléments fins et dépourvue de végétation et celui de *huraagandu* correspond à une accumulation de sédiments grossiers comme les galets.

D'après les observations que nous avons effectuées à partir de cartes marines (Admiralty Survey, 1992a, c, b, d), d'ouvrages généraux (Godfrey T., 1999) et de photographies aériennes, sur les 2 232 récifs que nous avons identifiés dans l'archipel maldivien, 644 portent des accumulations sédimentaires (cf. Figure 67). Sur ces 644 récifs, 344 sont localisés sur la périphérie des 26 atolls que compte l'archipel et 303 sont situés en positions lagunaires (cf. Figure 68). Du fait de l'influence des agents hydrodynamiques dans l'élaboration des dépôts (houle, vague, marée), les récifs périphériques devraient être logiquement majoritaires mais *in fine* s'ils le sont, c'est de peu. Cette particularité concerne l'ensemble de l'archipel car si l'atoll septentrional possède à part égale des îles sur ses récifs lagunaires et périphériques, les atolls de Maalhosmadulu nord et sud possèdent respectivement un nombre plus important d'accumulations sédimentaires sur ses récifs lagunaires et sur ses récifs périphériques. Ces accumulations semblent se déposer de façon aléatoire dès que l'ensemble des conditions sont requises.

Comme nous l'avons fait précédemment à l'échelle des récifs, nous avons souhaité analyser l'orientation majeure des accumulations sédimentaires afin d'évaluer le degré d'influence d'événements extérieurs dans leur édification. Les contrastes morphologiques entre le nord et le sud de l'archipel maldivien suggèrent, en effet, que différents facteurs ont pu contrôler et contrôlent encore actuellement l'évolution des îles (Woodroffe C.D., 1992). Cet auteur considère même que la croissance récifale et la formation des îles sont différentes d'un atoll à l'autre. Comme l'avait observé J.S. Gardiner (1903), chaque île dans l'archipel des Maldives semble régie par des conditions différentes.

Figure 67 : Relation entre le nombre de récifs et le nombre d'accumulations sédimentaires

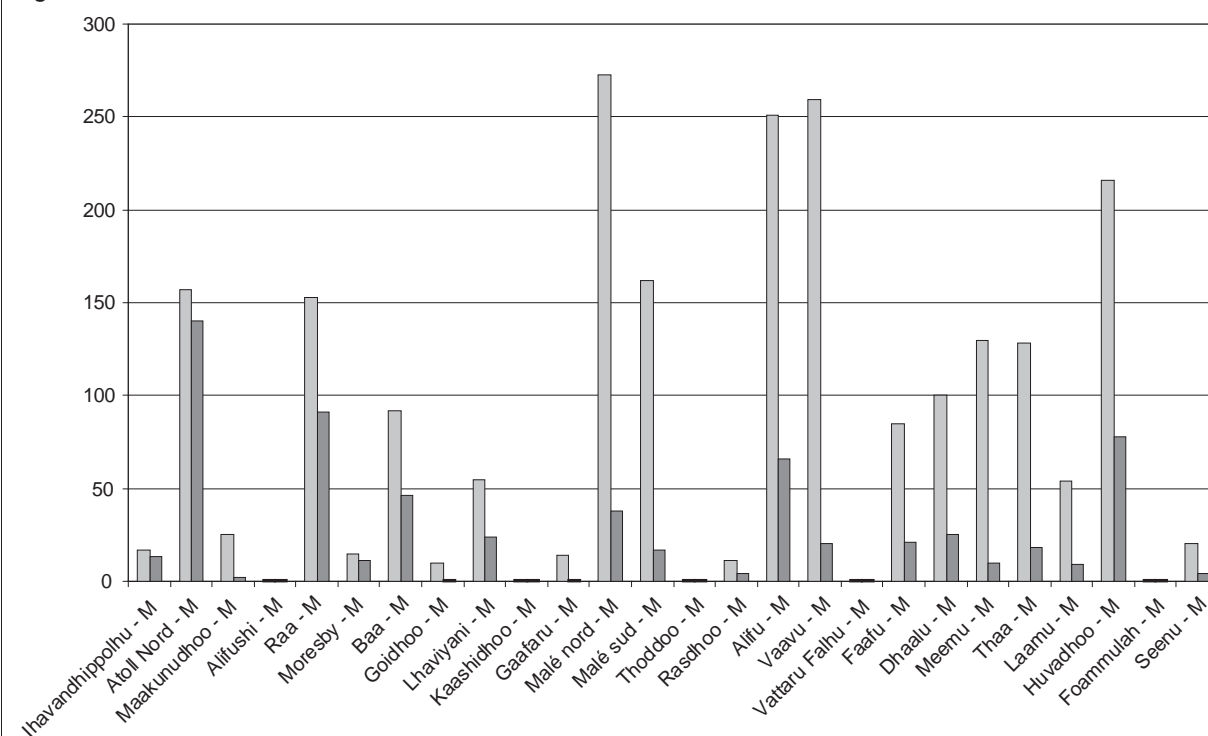
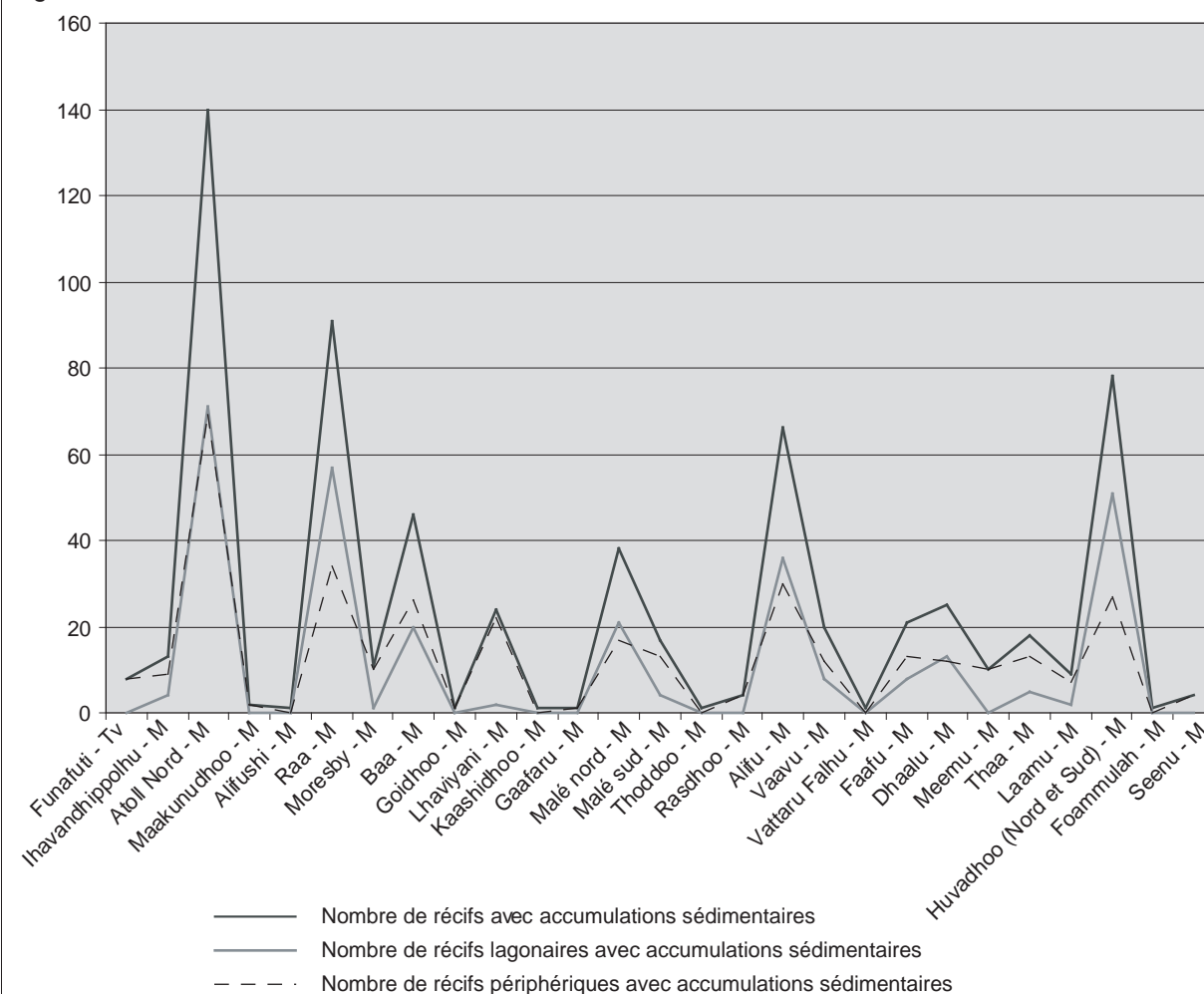


Figure 68 : Distribution des accumulations sédimentaires



Pour effectuer cette observation, nous nous sommes aidée des séries de photographies aériennes de 1969 et 1999. Ces missions, notamment celle de 1969 (Ministry of Planning and Environment, 1992), prévoyaient de comptabiliser le nombre exact d'îles afin de réestimer la superficie totale des terres émergées. Ainsi, 1 463 îles ont été répertoriées pour 182,7 km². Au cours de cette mission, a été considérée comme île toute terre végétalisée, les plages situées au-dessus des laisses des plus hautes mers ont été rattachées au domaine maritime et n'ont pas été prises en compte pour le calcul de la superficie totale de l'archipel. Afin d'effectuer des comparaisons, les cartographes se sont référés aux cartes anciennes du XIX^e siècle qui considéraient l'archipel riche de 1 130 îles, ce qui indiquait de larges fluctuations dans le temps. Ce dernier constat conduisait à confronter la réalité avec une nouvelle analyse des clichés (Ministry of Planning and Environment, 1992). A l'issue de cette opération, 78 îles n'ont pas été retrouvées, 13 nouvelles ont été identifiées et 29 sont apparues de façon naturelle. Les îles ont été répertoriées par classes : 561 îles font moins de 5 ha, 887 font plus de 25 ha, et 15 font environ 180 ha.

Nous aurions souhaité avec la série de 1999 évaluer le nombre d'îles afin d'estimer l'évolution morphologique des dépôts sédimentaires de l'archipel. Malheureusement, toutes les photographies aériennes n'étaient pas disponibles et certains atolls étaient sous-représentés comme, par exemple, ceux de Mulaku, Nilandhu nord et sud.

Nous avons donc effectué nos analyses à partir des 951 îles présentes sur les deux séries de photographies.

Tableau 5 : Recensement des îles identifiées par photographies aériennes

Atoll d'Ihavandhippolhu : 23 îles	Thoddoo : 1 île
Atoll de Maamakunudhoo : 3 îles	Atoll de Rasdhoo : 3 îles
Atoll Septentrional: 165 îles	Atoll d'Ari : 73 îles
Alifushi : 2 îles	Atoll de Nilandhu nord : 1 île
Atoll de Maalhosmadulu nord : 67 îles	Atoll de Felidhu : 16 îles
Atoll de Maalhosmadulu sud : 50 îles	Atoll de Vattaru : 1 île
Atoll de Moresby : 9 îles	Atoll de Mulaku : 4 îles
Atoll de Goidhoo : 6 îles	Atoll de Kolhumadulu : 65 îles
Atoll de Faadhippolhu: 53 îles	Atoll de Hadhdhunmathee : 73 îles
Atoll de Gaafaru : 1 île	Atoll d'Huvadhoo : 220 îles
Atoll de Malé nord : 56 îles	Foammulah : 1 île
Atoll de Malé sud : 32 îles	Atoll d'Addu : 25 îles
Kaashidhoo : 1 île	

D'une manière générale, les directions majeures des îles n'ont pas changé entre 1969 et 1999. Ces dernières ont pu migrer au sein du platier récifal, s'éroder, mais peu d'entre elles ont disparu ou se sont créées. Les directions, estimées elles aussi à partir du plus grand axe de l'île, sont assez

proches de celles observées pour les récifs, à quelques exceptions près (cf. Figure 69). La direction sud-sud-est – nord-nord-ouest est la plus représentée même si on retrouve bon nombre d'îles qui s'orientent suivant une direction sud-est - nord-ouest, nord-nord-est – sud-sud-ouest et nord-est - sud-ouest. La réactivité des îles au changement hydrodynamique est donc largement plus importante que pour les récifs.

Les observations faites à partir de ces photographies aériennes ont permis également de montrer que :

- les îles sont rares sur les farus,
- celles qui se sont développées sur l'ensemble du platier ou dans le centre des récifs ronds ou ovales apparaissent stables,
- les îles allongées ou linéaires n'évoluent pas différemment des autres, malgré l'affirmation de M. Ali (2000),
- les îles recouvertes d'une végétation mature sont stables par rapport aux îles plantées d'une végétation pionnière,
- la présence de récifs constitués de plusieurs îles est extrêmement rare dans le nord de l'archipel mais est un fait plus courant dans le sud qui possède de longues barrières récifales proches des structures tuvaluanes.
- les îles composées de gros blocs et de blocailles sont plus stables que les îles sableuses, d'après M. Ali (2000).

Pour l'ensemble de l'archipel (cf. Figure 70), les deux directions est-sud-est – ouest-nord-ouest et sud-est – nord-ouest sont finalement les plus représentatives de la disposition des îles et des récifs, ce qui permet de considérer qu'il existe une certaine symétrie des formes entre les îles et les récifs. D'après les observations concernant les couples récifs-îles, il apparaît que leur orientation varie très légèrement entre le nord et le sud de l'archipel. Darwin (1842) avait constaté que les îles se localisaient sur des façades récifales différentes suivant leur distribution dans l'archipel mais principalement sur la façade orientale des atolls. De même, J.S. Gardiner (1903) avait observé que les îles se localisaient préférentiellement sur la façade orientale des récifs du secteur nord de l'archipel et dans le secteur sud-est pour la partie méridionale. R.B.S. Sewell (1936) considère que les îles situées dans le nord de l'archipel sont localisées à l'est-sud-est du platier récifal et à l'est-nord-est pour l'archipel sud.

Les formes préférentielles des accumulations sédimentaires sont comme celles des récifs, ovales et allongées, même si les autres formes sont plus représentées comme celles dites « triangulaires ». Ainsi, les îles épousent la forme des récifs sur lesquels elles s'accumulent. Cette coïncidence entre les morphologies des récifs et des îles est également perceptible dans l'archipel des Tuvalu pour les ensembles de Fongafale et de Funafara dans l'atoll de Funafuti (cf. Figure 71).

Figure 69 : Principales orientations des accumulations sédimentaires dans l'archipel des Maldives

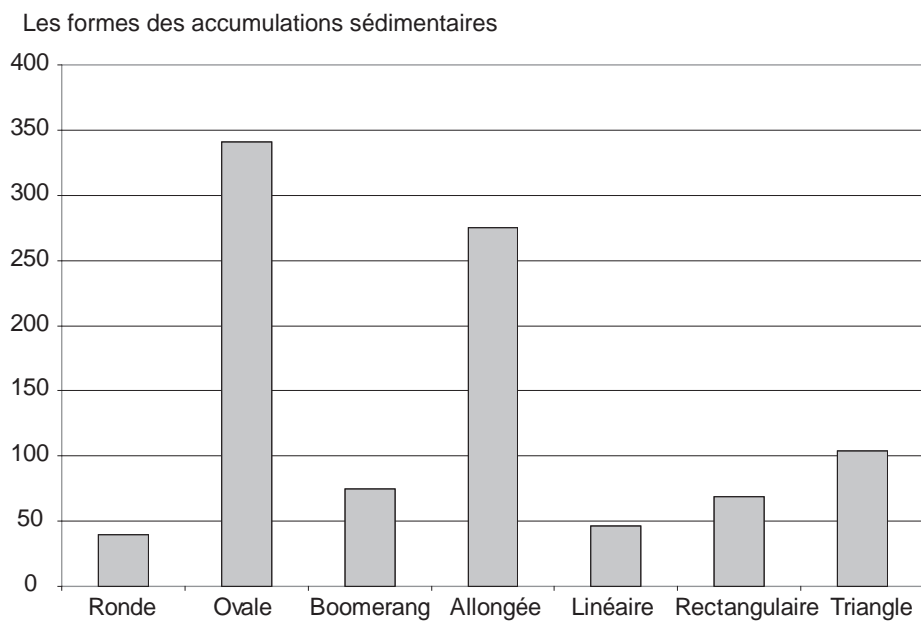
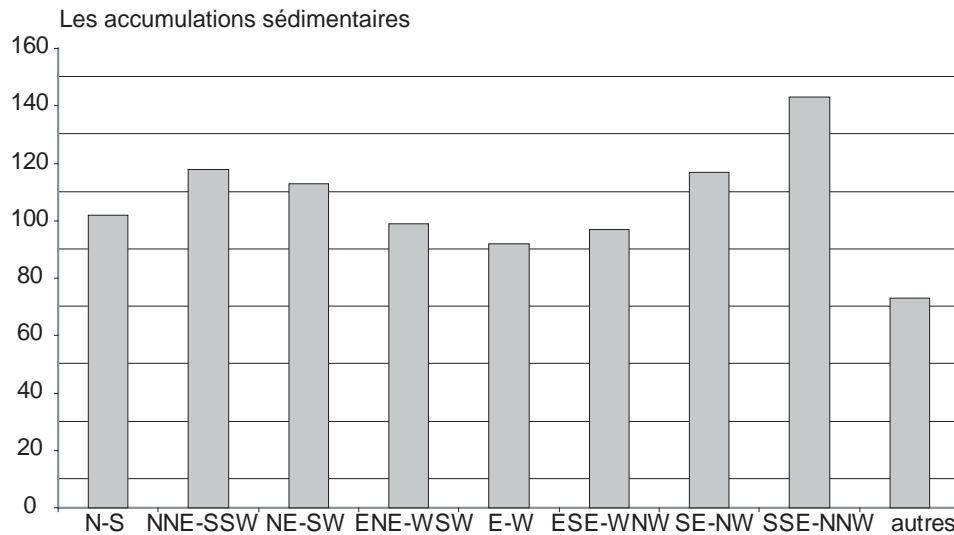


Figure 70 : Orientations principales des îles et des récifs dans les atolls maldiviens, d'après photo-interprétation, entre 1969 et 1999

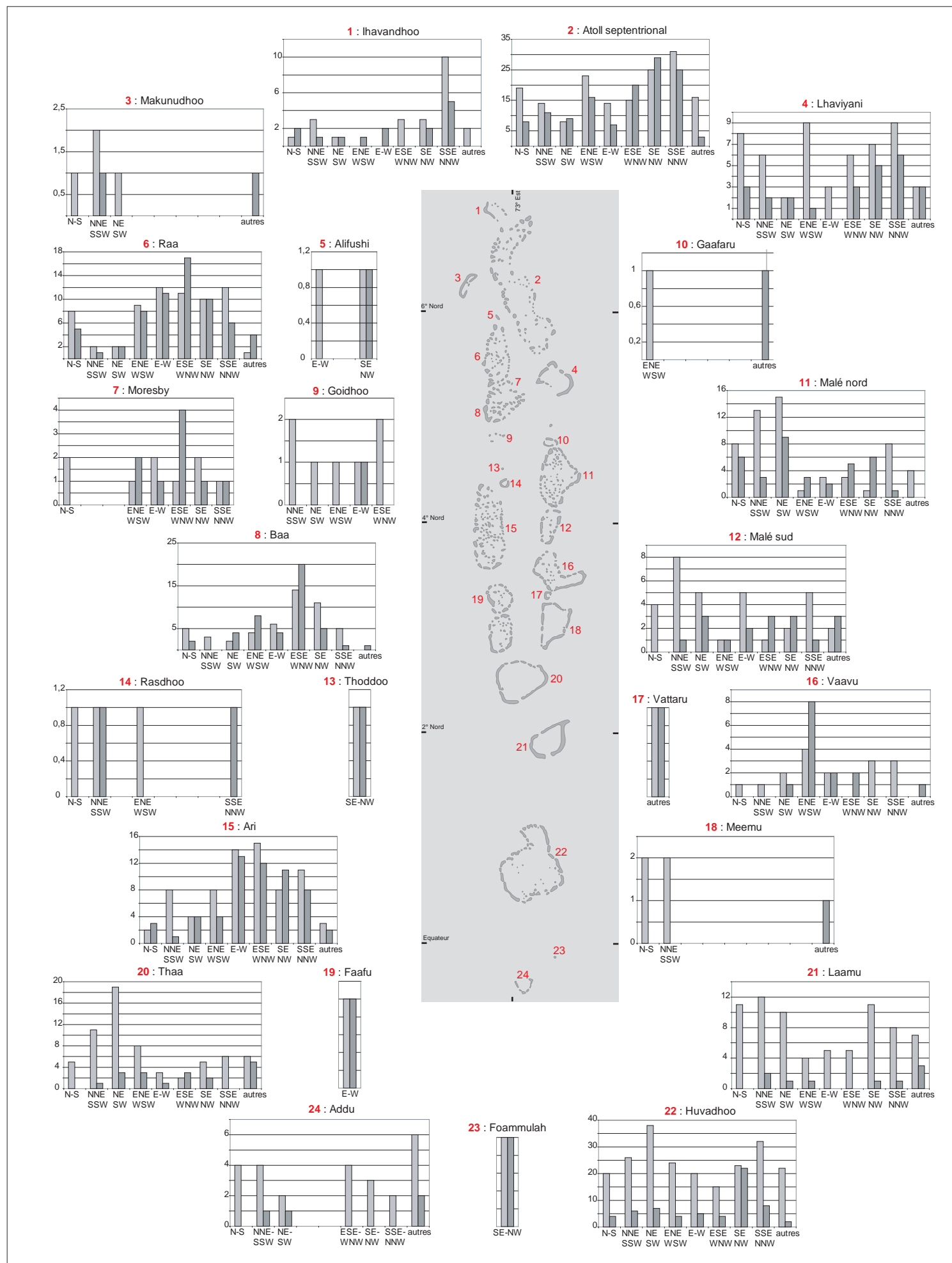
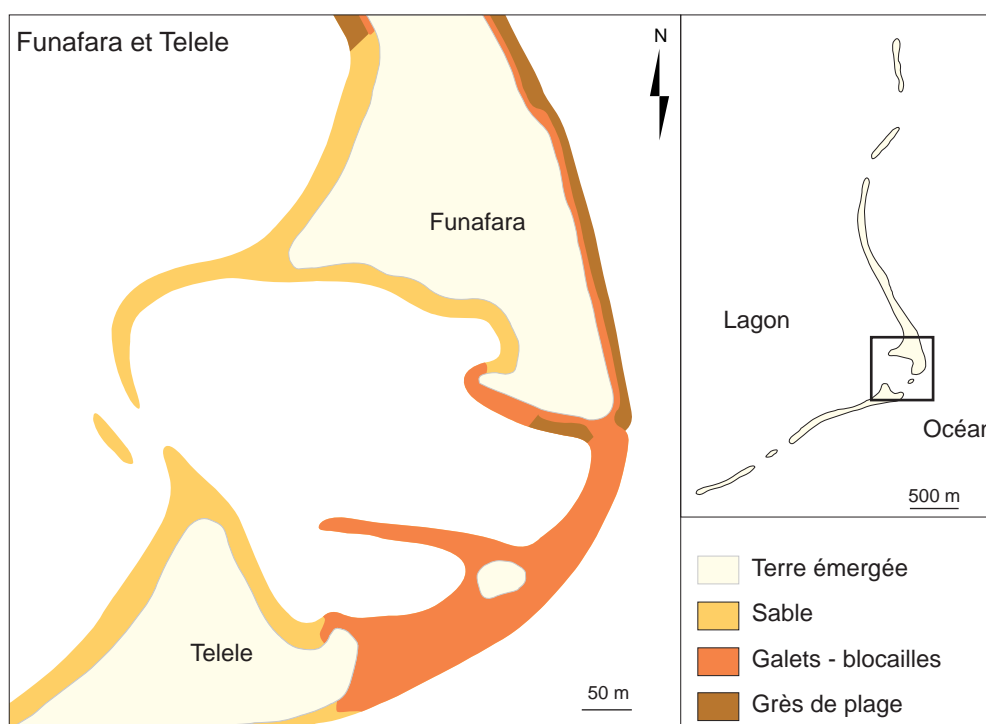
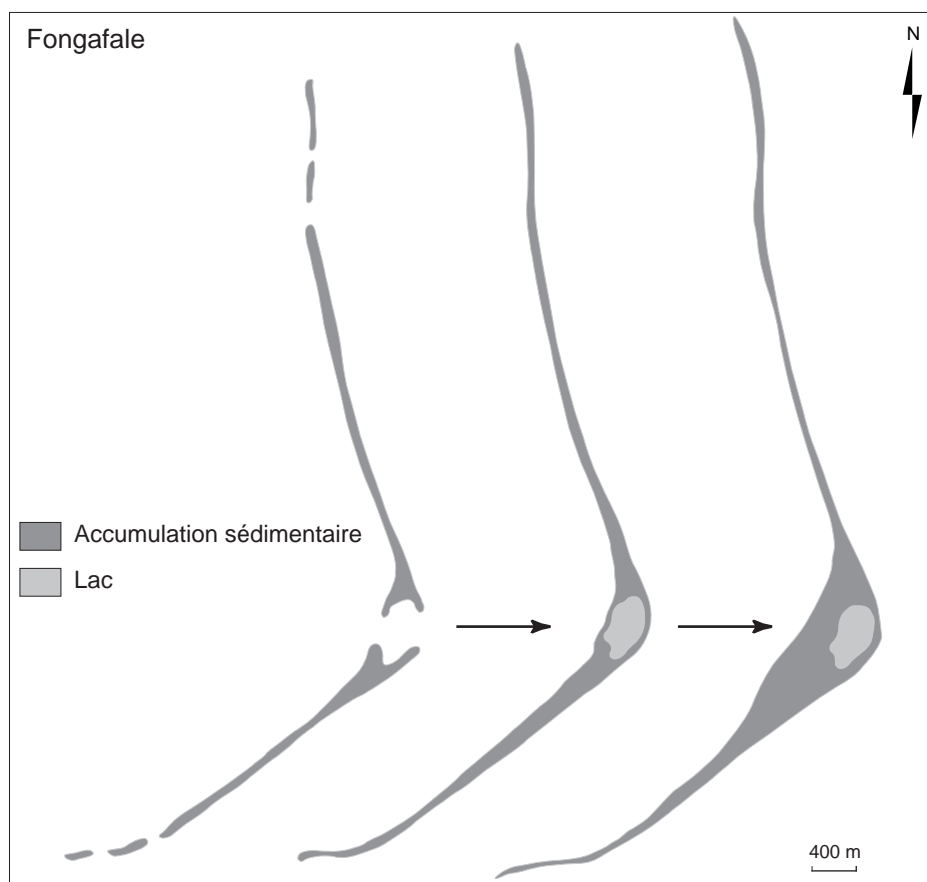


Figure 71 : Evolution morphologique des îles de la bordure orientale de l'atoll de Funafuti (d'après Xue C., 1995)



4.2. Evolution multiscalaire des îles

A la différence des récifs, qui ont pu être modélisés sous des conditions climatiques sensiblement différentes des conditions actuelles, l'évolution des îles Maldives est supposée récente, sauf pour quelques exceptions. Si certaines d'entre elles peuvent avoir des morphologies supposées antérieures à la période holocène (cf. Chapitre 3), elles sont rares. D'après les travaux menés par C.D. Woodroffe (1992) et par M. Ali (2000), les échantillons prélevés dans certaines îles de l'atoll de Maalhosmadulu sud puis datés (cf. Figure 72 - annexe) indiquent des âges compris entre 4 000 et 1 000 BP ; seules les îles d'Hulhudhoo et d'Undoodhoo sont comprises entre 4 000 et 4 999 BP. Cependant, aucun forage périphérique secondaire n'ayant été effectué, notamment dans le secteur oriental de l'île, au plus près des environnements que nous avons identifiés comme des dépôts pré-holocènes ou holocènes (cf. Chapitre 3.3.2.4.), des données manquent pour étayer notre démonstration.

La disparité des âges d'édification des îles d'un même atoll, semble pouvoir s'expliquer par des micro-variations eustatiques successives depuis 5 000 BP ou par des conditions extérieures extrêmes, empêchant les dépôts de s'accumuler sur les côtes ouest.

Si de nombreux auteurs (Schofield J.C., 1977a, b ; Gourlay M.R., 1988 ; Woodroffe C.D., 1992 ; Dickinson W.R., 1999, 2003) confirment une naissance tardive des îles aux alentours de 4 000 - 3 000 BP et quelquefois 1 000 BP (McLean R.F. et Hosking P.L., 1991), d'autres auteurs (Anderson R. C., 1998 ; I.N.Q.U.A., 2000 ; Mörner N-A. *et al.*, 2004) estiment que l'archipel des Maldives existait en tant que tel avant le dernier Maximum Glaciaire.

Aux Tuvalu (cf. Figure 73 - annexe), les âges respectifs des îles et des morphologies identifiées sur le terrain appartiennent également à l'Holocène puisque les échantillons sont tous compris entre $1\,015 \pm 130$ BP et $4\,040 \pm 165$ BP.

Sauf lorsqu'il reste des témoins de variations eustatiques antérieures, l'édification des îles débute une fois que la consolidation des platiers récifaux a été assurée et se poursuit encore à l'heure actuelle.

Bien que les datations nous renseignent sur l'évolution insulaire, elles sont insuffisantes pour indiquer si les îles se sont construites de façon continue ou épisodique, ou si leur construction a été interrompue par des périodes de tempêtes.

Pour tenter de répondre à ces questions, nous avons observé le comportement des îles à différentes échelles de temps et d'espace. Il s'agit de dégager les tendances évolutives sur le moyen et le court terme des constructions sédimentaires. Pour cela, nous avons eu recours à différentes méthodes comme l'analyse par photointerprétation, même si un redressage fiable des images n'a pas pu permettre une quantification, la comparaison de levés de terrains, l'utilisation de cartes anciennes, de documents historiques qui nous ont permis de supposer des évolutions sans en apprécier

quantitativement le recul ou le gain. Ainsi, la comparaison entre les deux séries de cartes marines disponibles sur l'archipel (cf. Figures 74,75,76 - annexe) a pu nous apporter quelques indications sur la stabilité ou non de ces morphologies depuis la fin du XIX^e siècle jusqu'à aujourd'hui. L'échelle de comparaison dans la forme des îles ne permet pas d'envisager une interprétation objective de cette évolution mais suggère toutefois quelques pistes de recherche.

Préalablement à ces suivis, nous avons imaginé de travailler sur plusieurs îles, mais l'insularité exacerbée des deux archipels et la difficulté de transport nous ont contrainte à abandonner cette idée.

Le choix d'étudier les îles de Vilingili et de Rasfari nous a donc été dicté par le terrain. Nous souhaitons mesurer l'évolution d'îles influencées par deux facteurs, l'homme et la nature. Notre choix s'est tout naturellement orienté vers Vilingili qui possède des côtes basses aménagées par la présence de brise-lame, de quais, de jetées...et vers Rasfari, une île naturelle ne subissant pas l'influence anthropique dans l'évolution de ses côtes.

L'interdiction de séjourner pour les étrangers dans les îles habitées par la population locale de l'archipel des Maldives, hormis Malé et son annexe dortoir Vilingili, nous a imposé le premier choix conforté par la proximité et la facilité de transport vers cette île, dans un archipel si peu desservi. L'île naturelle fut plus difficile à sélectionner pour deux raisons. La première est administrative et liée aux multiples autorisations qui doivent être obtenues des ministères lorsque l'on souhaite travailler sur une île. La seconde relève une fois de plus des difficultés de transport. En effet, si des liaisons régulières sont assurées par bateau entre Malé, Hulhulé, Hulhumalé et Vilingili, la découverte d'une île naturelle impose de louer un Dhoni, embarcation propre aux Maldives. C'est pour faciliter les démarches et le déplacement que notre choix s'est porté sur l'île de Rasfari, propriété de la compagnie semi-privée des Télécommunications maldiviennes Dhiraagu. Un accord tacite fut passé avec la direction de cette société qui, en échange de l'autorisation d'effectuer le suivi topographique de l'île, mit à notre disposition un bateau rapide pour nous acheminer sur le site, pour les quatre levés des années 2000 et 2001. La découverte de travaux précédents lors de recherches bibliographiques au ministère de l'environnement de Malé nous a permis de disposer d'un historique de son évolution.

4.2.1. Le suivi topographique de l'île de Rasfari

Les analyses menées à partir des séries de photographies aériennes et des suivis topographiques apportent des données qui peuvent paraître trop courtes dans le temps et donc peu représentatives de l'évolution réelle de l'île. Cependant, elles ont l'avantage de nous fournir quelques informations sur les modifications engendrées à des échelles variées.

L'absence de repères de nivellement sur nos terrains nous a contrainte à privilégier deux repères : la marée (Tuvalu et Maldives) et les vermetes actuels (Maldives), lorsqu'ils étaient présents.

Nous pourrions bien évidemment discuter l'exactitude de ces repères, liés aux conditions météo-océaniques pour l'un et à la subjectivité de la localisation pour l'autre, mais il s'agissait des seuls moyens dont nous disposions pour avoir une référence la plus cohérente et la plus proche possible de la réalité du terrain.

L'île est constituée de matériaux bioclastiques carbonatés composés de sable de tailles diverses et de dalles de beach rock. Le placage sableux peu épais est présent tout autour de l'île et peu recouvrir ponctuellement certaines dalles. On peut identifier la présence de gros blocs démantelés des anciens niveaux de beach rock. Une végétation haute de type pandanus dans le secteur septentrional de l'île ainsi qu'un petit îlot de végétation dans la partie méridionale indiquent la position des accumulations initiales. Orientés NNE-SSW, les sédiments s'y sont accumulés à l'abri du dépôt initial jusqu'à atteindre le second îlot situé dans le secteur méridional.

La présence de dalles de beach rock de couleur noire, déchaussées et lapiazées, au pied de la ligne de végétation actuelle, montre leur ancienneté, confirmée par le démantèlement et la recimentation de certains de ces massifs de beach rock.

Comme l'écrit C.D. Woodroffe (1989), il s'agit d'une île stable, où seule la présence d'une microfalaise d'un mètre dans sa partie orientale montre les signes d'une érosion (cf. Figure 77). Cette dernière a dû être plus importante dans les périodes récentes du fait de l'exposition de grandes dalles de beach rock dans les quatre secteurs côtiers principaux de l'île. Bien cimenté, ce beach rock possède un angle quasi identique à celui de la plage sous jacente. Dans le secteur sud-ouest et sud-est, il est composé de plusieurs strates. La strate supérieure, qui correspond à une terrasse horizontale, est érodée à l'intérieur d'un dallage irrégulier. Pour ce qui concerne les sables, il n'y a aucun indice qui puisse indiquer s'ils ont été étagés ou imbriqués avant d'avoir été cimentés.

Dans son rapport de 1989, C.D. Woodroffe identifie une île longue de 247 m et large de 44 m, au maximum. Dans une étude d'impact (R.I.Y.A.N., 2000) commandée par la société propriétaire de l'île, ses dimensions sont évaluées à 300 m de long sur 30 m de large.

Les observations que nous avons faites à partir des photographies aériennes de 1969 et 1999 (cf. Figure 78 - annexe) montrent des morphologies insulaires assez similaires avec toutefois une multiplication d'affleurements de beach rocks depuis 1969, notamment sur la façade occidentale. Ces dalles bloquent entre elles les sables de plage ainsi que la ligne de végétation servant de barrière protectrice à l'île. En 1969, on observe dans le secteur NNE un vaste stock sédimentaire immergé qui n'existe plus en 1999. Ce dernier s'est en effet déplacé vers la façade orientale de l'île suivant une dérive nord-nord-est – sud-sud-ouest.

Cette île considérée comme stable, car la ligne de végétation n'a pas évolué, a fait ensuite l'objet de suivis topographiques sur deux années consécutives (2000 et 2001), à deux périodes de moussons différentes. Il s'agissait de saisir son évolution interannuelle et annuelle dans la perspective de changements climatiques. Etant située à environ 4 mètres au-dessus du niveau marégraphique, tout

Figure 77 : Présentation de l'Île de Rasfari, atoll de Malé nord



changement dans les vents, la houle, les vagues y est ressenti de façon exacerbée. Les profils indiqués sur les figures 79 et 80 ont été levés à partir d'un tachéomètre laser (Nikon DTM 300) et recalés par rapport à la marée immédiate prise à Hulhulé.

A partir des sept profils réalisés sur l'île nous avons pu observer que :

- les deux profils, n° 4 et n° 7, localisés à l'extrémité nord-est de l'accumulation sédimentaire montrent les érosions les plus significatives. Les différents gradins sédimentaires figurant sur le levé du profil n° 4 de novembre 2000 ont totalement disparu en novembre 2001. Les variations inter-annuelles apparaissent de façon claire puisque c'est entre novembre 2000 et juin 2001 que l'érosion a été la plus marquée, alors qu'elle s'est réduite entre juin et novembre 2001. Le profil n° 7 met en évidence une redistribution des sables tout au long de son profil.

- la microfalaise située en haut de plage de ce même profil n° 7, en contact avec la ligne de végétation, montre une morphologie quasi identique entre novembre 2000 et novembre 2001. L'érosion se situe en milieu de plage et se traduit par une redistribution des sables qui lissent le profil. On observe donc un gain sédimentaire en bas de plage, une érosion au milieu et en haut de plage.

- les autres profils, à part le secteur oriental du profil 3 qui met en évidence une érosion sédimentaire au niveau du platier récifal tendant d'ailleurs à diminuer entre juin et novembre 2001, montrent un engraissement minime sur l'ensemble des relevés.

- le profil 6 montre un gain sédimentaire du platier récifal sur ses façades est et ouest, avec un apport minime au niveau des dalles de beach rock nouvellement affleurantes.

- sur l'ensemble des profils en accrétion, celle qui est la plus marquée concerne le secteur ouest de l'île, confirmant un apport privilégié notamment au niveau du platier récifal.

Au plus proche de la ligne de végétation et cela pour l'ensemble des profils, l'évolution est assez constante. Plusieurs dalles de beach rock mises en saillie entre la ligne de végétation et l'accumulation sédimentaire servent de protection à l'île. Le secteur oriental composé de dalles lissées n'assure pas cette protection, d'autant que ce sont des vents et des houles de secteur est qui sont les causes de ces démaigrissements.

L'île de Rasfari a peu évolué depuis les clichés aériens de 1969. Localisée dans le secteur sud-sud-ouest du vaste récif qui la porte, ce dernier semble lui assurer une stabilité et reste à la fois le meilleur fournisseur de sédiments en cas de pénurie et le gardien en cas d'apport trop important. Il exerce, à la fois, le rôle de régulateur et d'agent de la morphogenèse côtière. L'étude de Rasfari ne confirme donc pas la caractéristique admise pour les accumulations sédimentaires des îles basses atolliennes, à savoir leur grande mobilité saisonnière (cf. Figure 81).

Figure 79 : Comparaisons de profils littoraux dans l'île de Rasfari entre novembre 2000 et 2001 - A

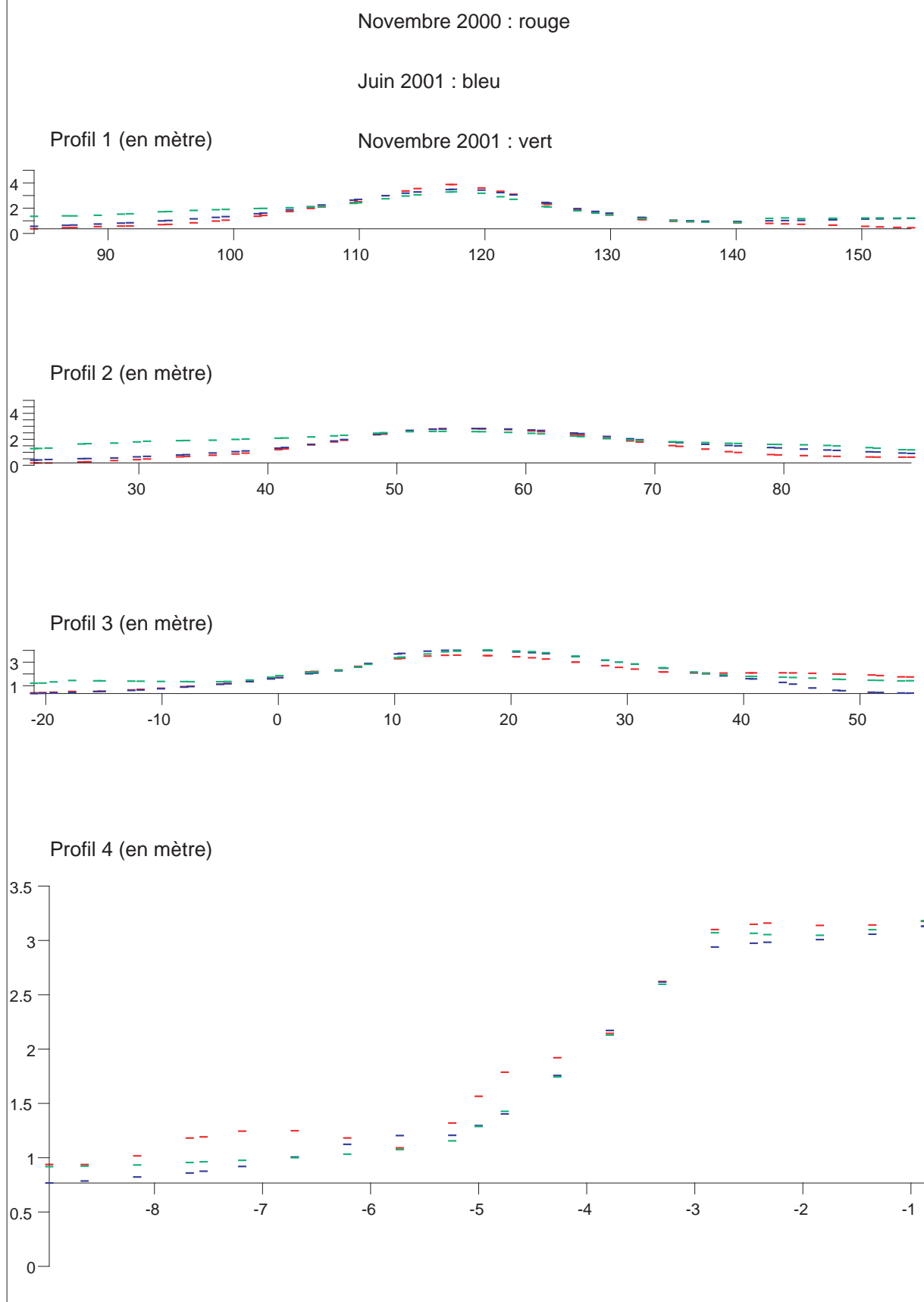


Figure 80 : Comparaisons de profils littoraux sur l'île de Rasfarai entre novembre 2000 et 2001 - B

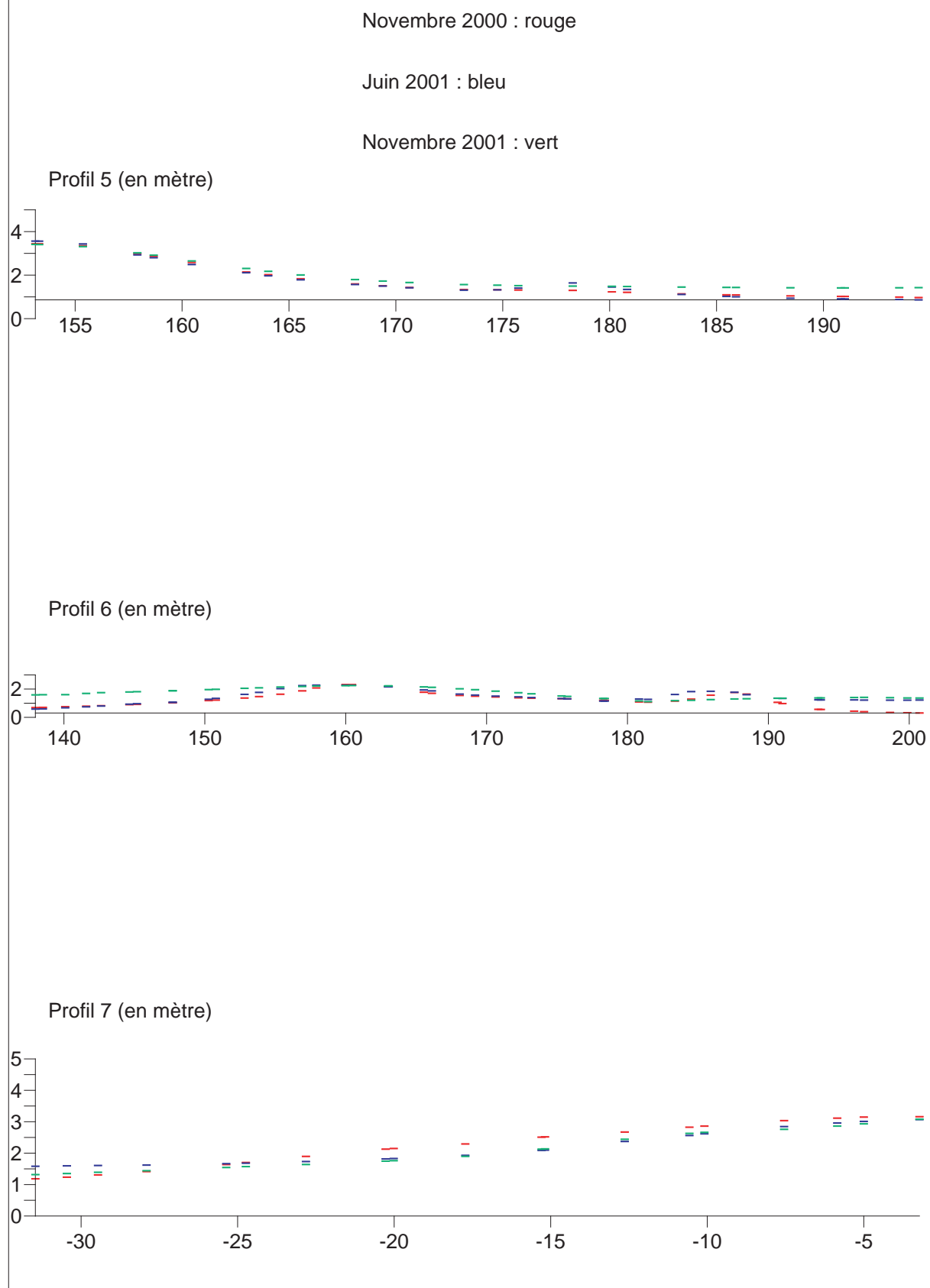
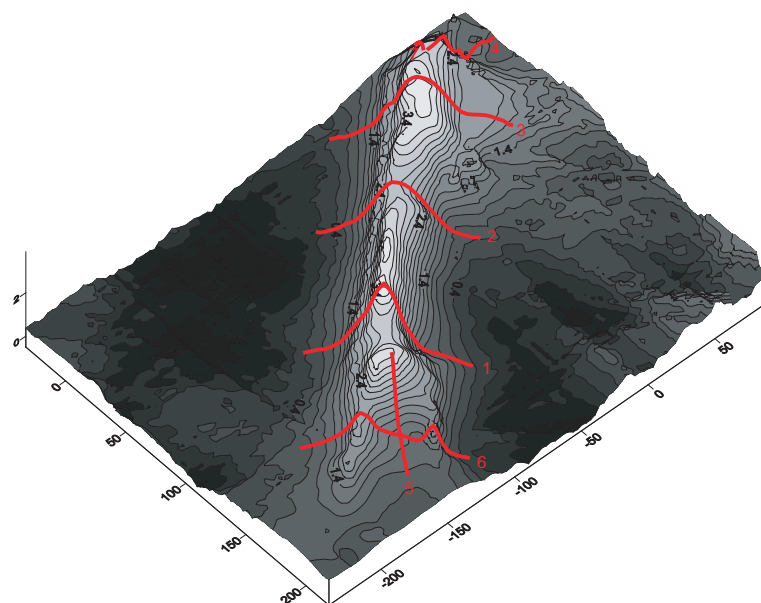
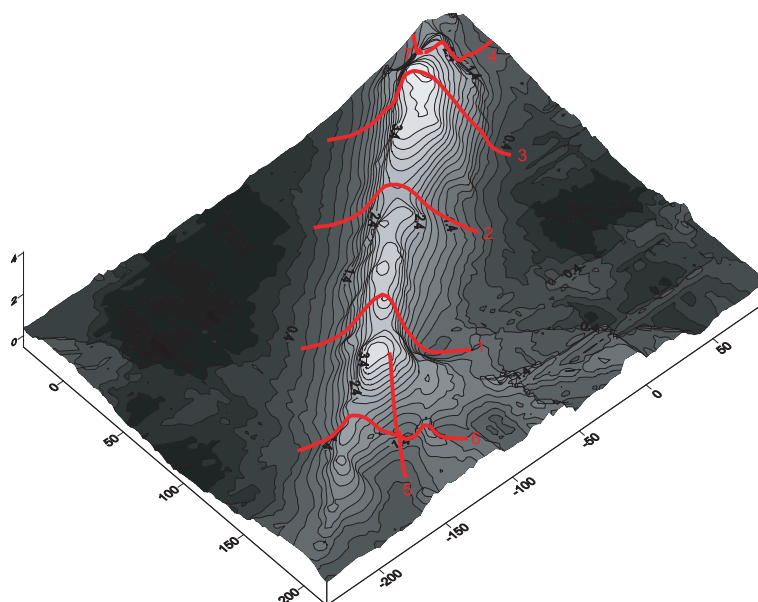


Figure 81 : Modèles numériques de terrain de l'île de Rasfari entre novembre 2000 et novembre 2001

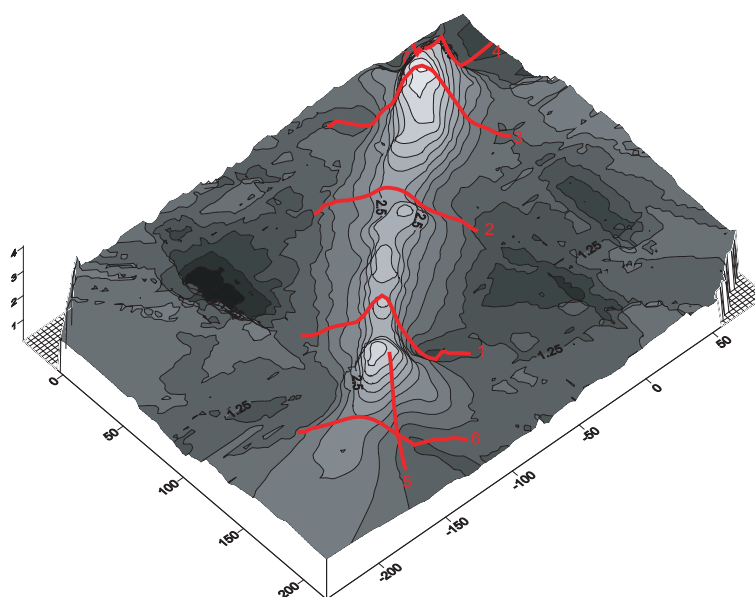
Novembre 2000



Juin 2001



Novembre 2001



Les axes X,Y, Z sont exprimés en mètre

4.2.2. Le suivi topographique de l'île de Vilingili

La comparaison des photographies aériennes de 1969 et 1999 (cf. Figure 82) montre quelques changements notoires dans la morphologie de l'île, liés principalement aux aménagements anthropiques. La ligne de végétation considérée sur les îles basses coralliennes comme la ligne de référence est quasi identique, à l'exception de la jeune végétation identifiée sur la photographie de 1969 qui est devenue mature sur celle de 1999. Les accumulations sédimentaires de type galets et sables fins n'ayant pu être différenciées lors de l'interprétation, seuls les blocs et les conglomérats ont été distingués. Les plages sableuses semblent avoir perdu de leur ampleur, mais, si ce fait peut être lié à la dynamique des plages, il peut résulter également d'une interprétation subjective des documents photographiques.

Le développement d'un sol épais, la taille et l'abondance de la végétation confirment l'ancienneté de l'île. Elle est composée de matériaux coralliens démantelés puis accumulés sur le platier. On trouve des matériaux fins, d'autres grossiers comme les galets, de gros blocs et la trace d'un ancien conglomérat en avant de la plage actuelle. Ce conglomérat situé dans le secteur sud-sud-est de l'île présente des éléments coralliens grossiers, lithifiés puis exposés lors d'un bas niveau marin. Comme le souligne P. A. Pirazzoli (1998), leur distribution sur une côte permet d'identifier les secteurs fortement battus par la mer. Les conglomérats se situent sur le platier récifal au plus proche de sa bordure et permettent d'identifier la direction des vents et des houles lors de leur consolidation, c'est-à-dire de secteur sud-sud-est, sud-est. Curieusement toutes les observations de terrain que nous avons menées dans cette île montrent une distribution des témoins eustatiques antérieurs uniquement dans ce secteur insulaire qui présente une morphologie particulière, dite en « poêle à frire ». Faut-il y voir le noyau primitif de l'île actuelle ?

Cette dernière montre des plages composées de sédiments fins accumulés au-dessus d'un tapis de galets mis en évidence lors des fortes conditions hydrodynamiques de novembre 2000 (cf. Figure 83, profil n° 3). L'absence de dalles de beach rock, sinon de façon extrêmement ponctuelle sur une des plages de l'île, montre également une certaine stabilité de l'accumulation. Des aménagements artificiels réalisés par l'homme apparaissent également sous la forme de deux structures portuaires implantées dans les secteurs est-nord-est et ouest-nord-ouest, de murs de protection et d'un brise-lames localisé au devant du port oriental. Il existe trois grandes plages de sables fins localisées respectivement au nord, à l'est - sud-est et au sud-sud-ouest de l'île (cf. Figure 83). Elles évoluent de façon saisonnière comme le montre l'analyse des profils élaborés en 2000. On observe une importante érosion des plages exposées au vent et aux houles sur les façades nord, (profil n° 3) avec la présence de microfalgues, où des arbres sont menacés d'être déchaussés, et est de l'île (profil n° 1). A l'inverse, les plages situées au sud-sud-est (n° 4) et à l'ouest (n°2) montrent des profils stables ou en légère accrétion avec une remontée des galets en haut de plage.

Figure 82 : L'île de Viilingili, atoll de Kaafu, de 1969 à 1999

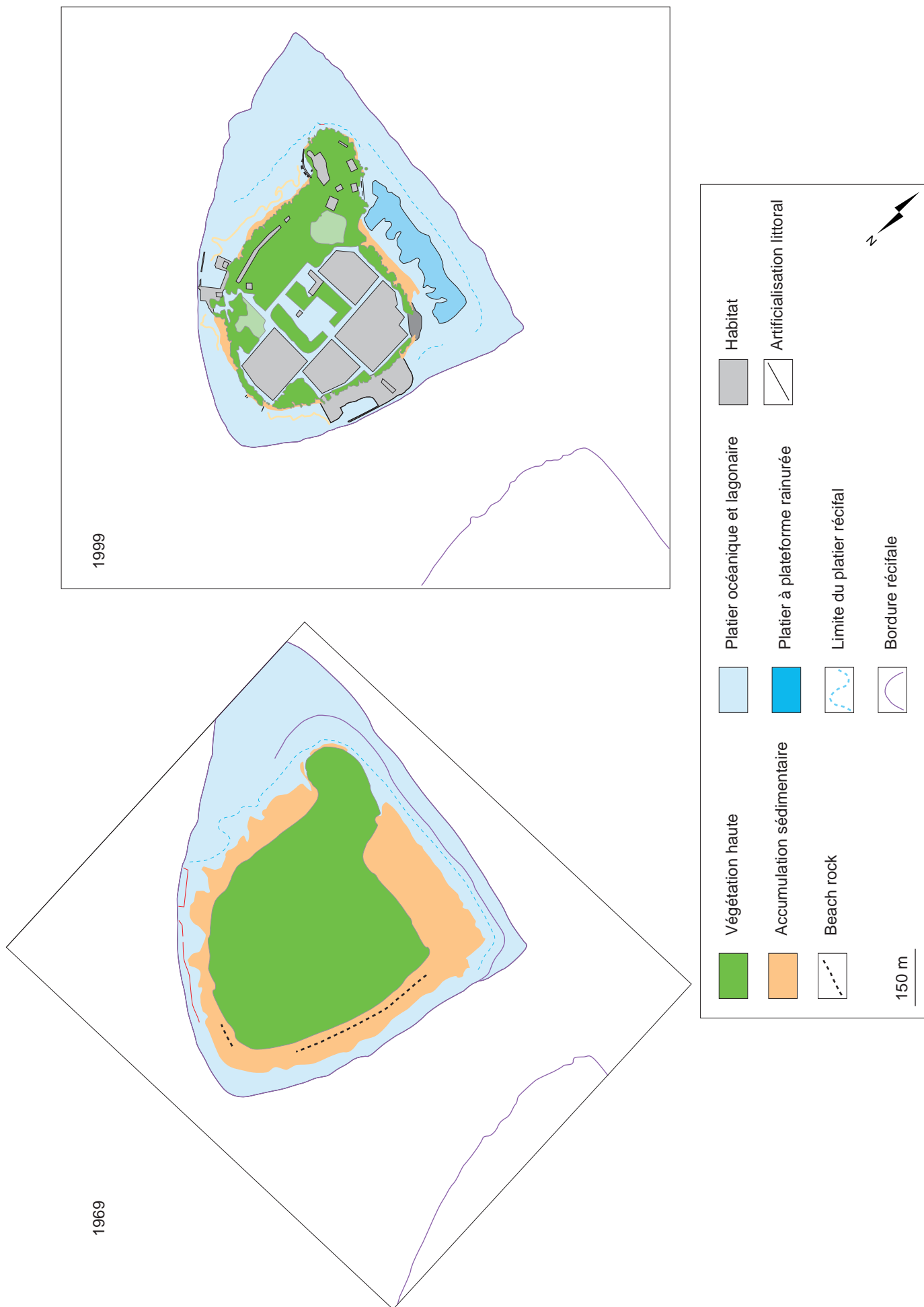
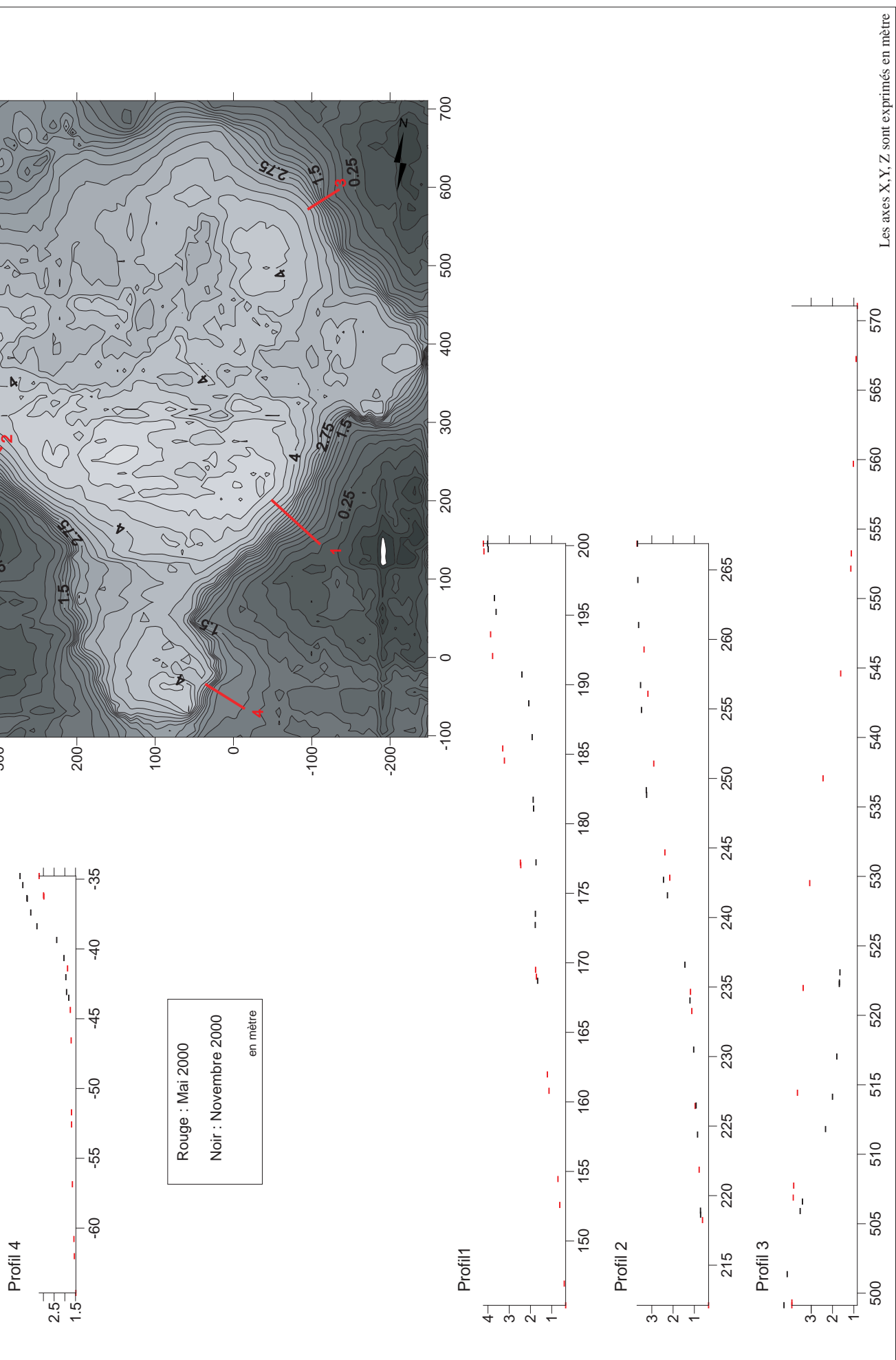


Figure 83 : Comparaisons de profils dans l'île de Vilingili, atoll de Kaafu, entre mai 2000 et novembre 2000 : exemples de variations saisonnières



4.2.3. L'évolution morphologique de l'île de Fongafale

Située sur la façade orientale de l'atoll de Funafuti, l'île de Fongafale s'étire sur plus de 11 km de long. Elle possède une forme en « V » correspondant à la forme du récif qui la porte avec deux accumulations nord et sud très étroites et une partie centrale plus développée, correspondant au coude du récif. Si la partie septentrionale a été reliée artificiellement avec l'île voisine de Tengako, l'extrémité méridionale est en voie d'accrétion (cf. Figure 84) comme le prouvent les dépôts successifs de crêtes sédimentaires constituées de galets coralliens.

Le platier lagunaire est large de 55 à 350 m (Xue C. et Malologa F., 1995) et, en son sein, on peut observer des beach rocks, des patates coralliennes vivantes, du sable et un ancien platier récifal désagréé (cf. Figure 85).

Trois grandes cellules littorales y ont été identifiées, auxquelles nous ajouterons des cellules secondaires déterminées par des quais plus petits en voie de démantèlement. Le secteur méridional correspond à la zone s'étendant de l'extrémité sud de l'île jusqu'au quai de Vaiaku. Le suivant va du quai de Vaiaku à celui de Catalina, communément appelé la rampe de Catalina. Enfin, le secteur nord recouvre toute la partie septentrionale de l'île

La présence de nombreux petits quais implique un micro compartimentage sédimentaire qui perturbe le transit des galets coralliens et du sable, lequel revient rarement à la côte. En effet, le sable s'accumule en une couche fine au pied du seul hôtel de l'île ou un peu plus au nord, au niveau du grand maneapa²⁹.

D'après les travaux menés par la S.O.P.A.C. de 1985 à 1994 (Howorth R., 1985, 1986 ; Howorth R. et Radke B., 1987 ; Howorth R. et Woodward P., 1994 ; Xue C. et Malologa F., 1995), l'évolution de la côte lagunaire de Fongafale montre des signes d'érosion par le déchaussement de la végétation. L'absence de plages composées de matériaux sédimentaires de type galets ou sable rend difficile la mesure de l'érosion. En effet, les différentes dalles de beach rock ou les gros blocs issus d'anciens beach rocks démantelés ne montrent aucune évolution, du moins pas quantifiable pour la précision d'un appareil de mesure comme le théodolite. Certains auteurs ont toutefois estimé l'érosion à 2 m depuis 1943. La comparaison de photographies aériennes que nous avons réalisée entre 1941 et 1994 ne montre pas de changements sur le tracé du littoral mais indique des différences entre les matériaux composant la côte lagunaire, ce qu'expliquent les aménagements réalisés durant la Seconde Guerre Mondiale (cf. Figure 86).

Sur la façade océanique, les levés de terrain sont plus rares et montrent généralement une migration des éléments coralliens grossiers au plus proche de la ligne de végétation, notamment pour le bras sud de l'île. Ce dernier est composé des éléments coralliens datant d'un précédent cyclone. Le bras nord, même si une partie de sa côte est accumulée en galets, possède de nombreuses dalles de beach rock en

²⁹ Maison communautaire.

Figure 84 : Evolution de différents secteurs côtiers lagunaires dans l'île de Fongafale

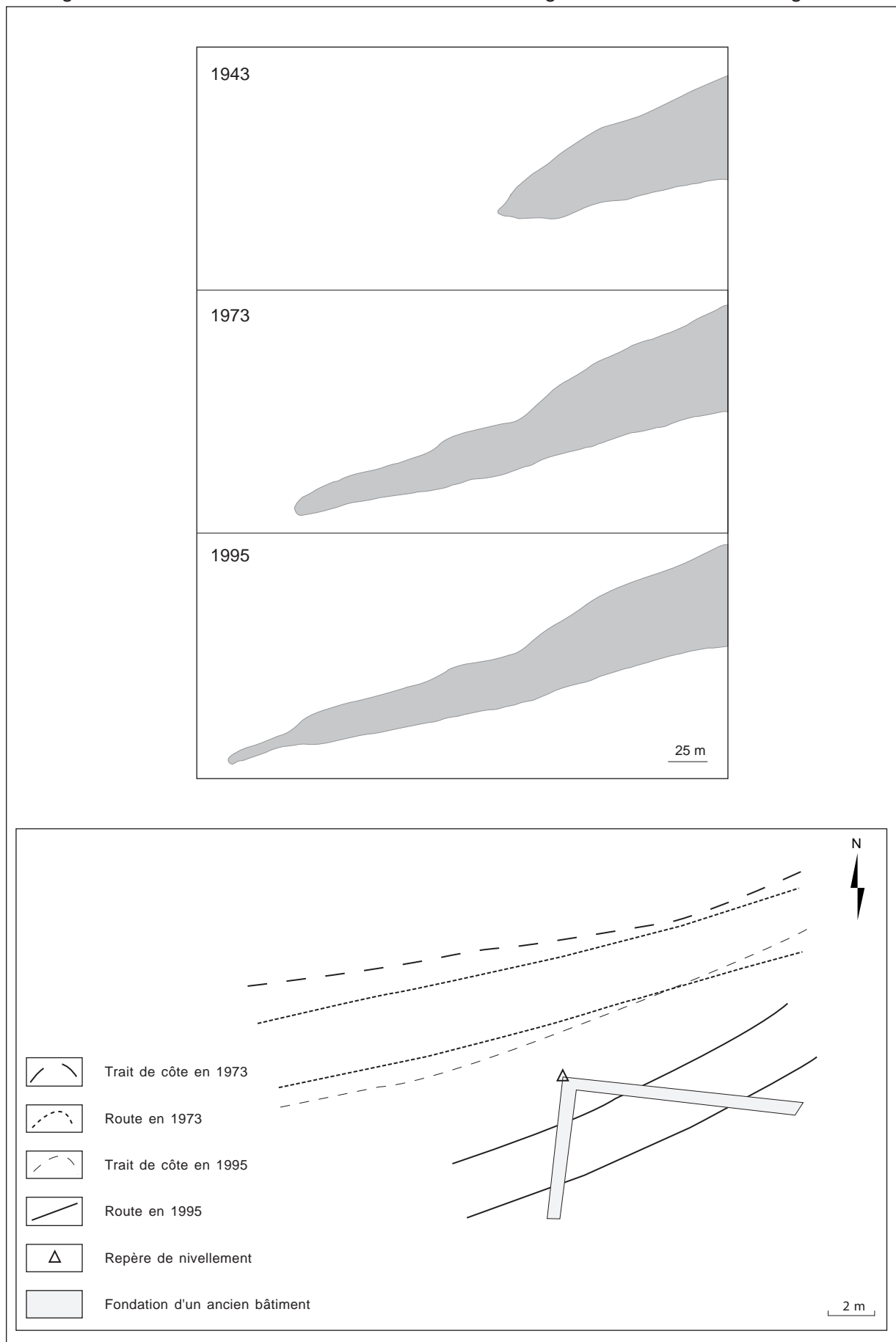
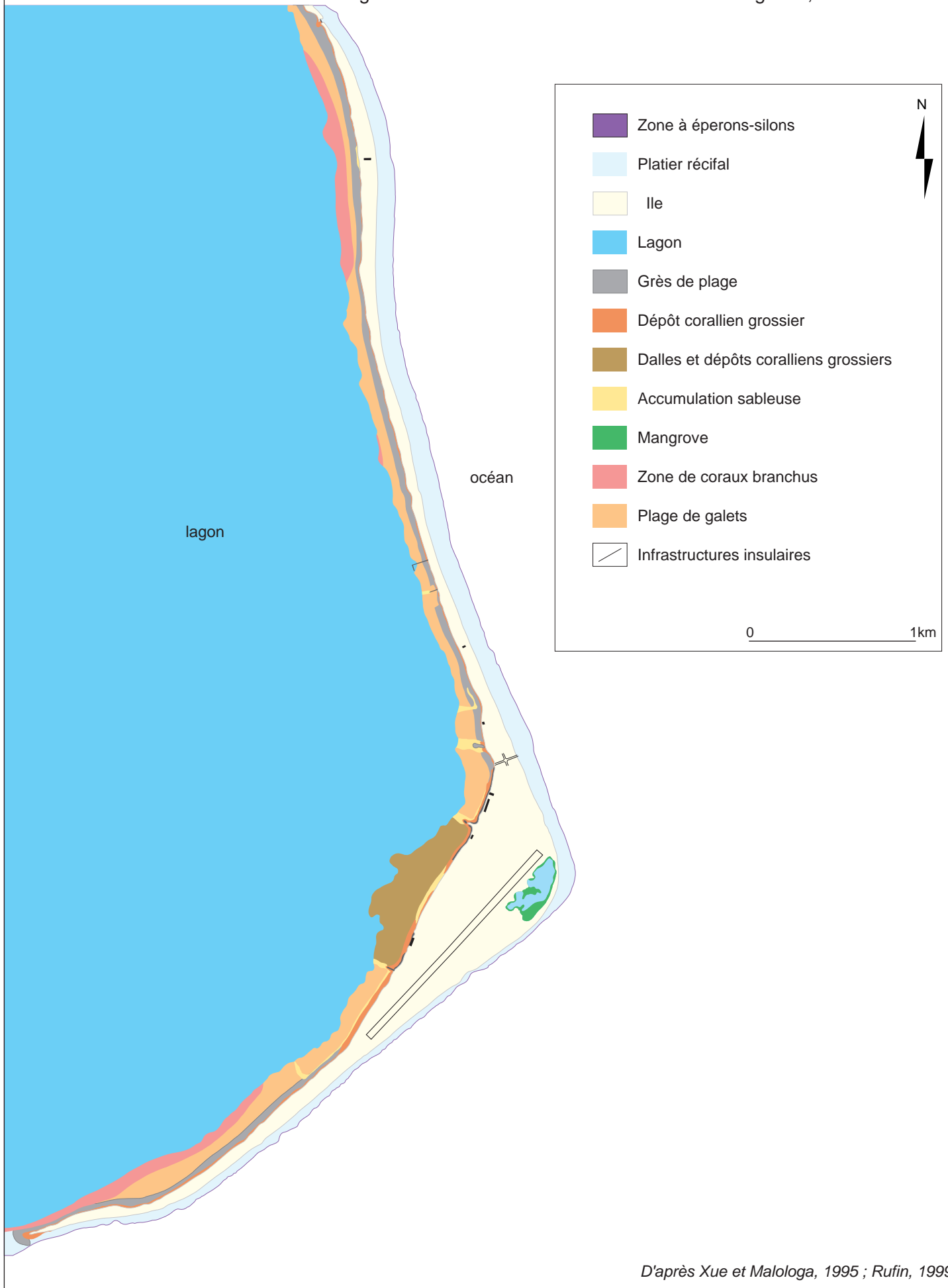
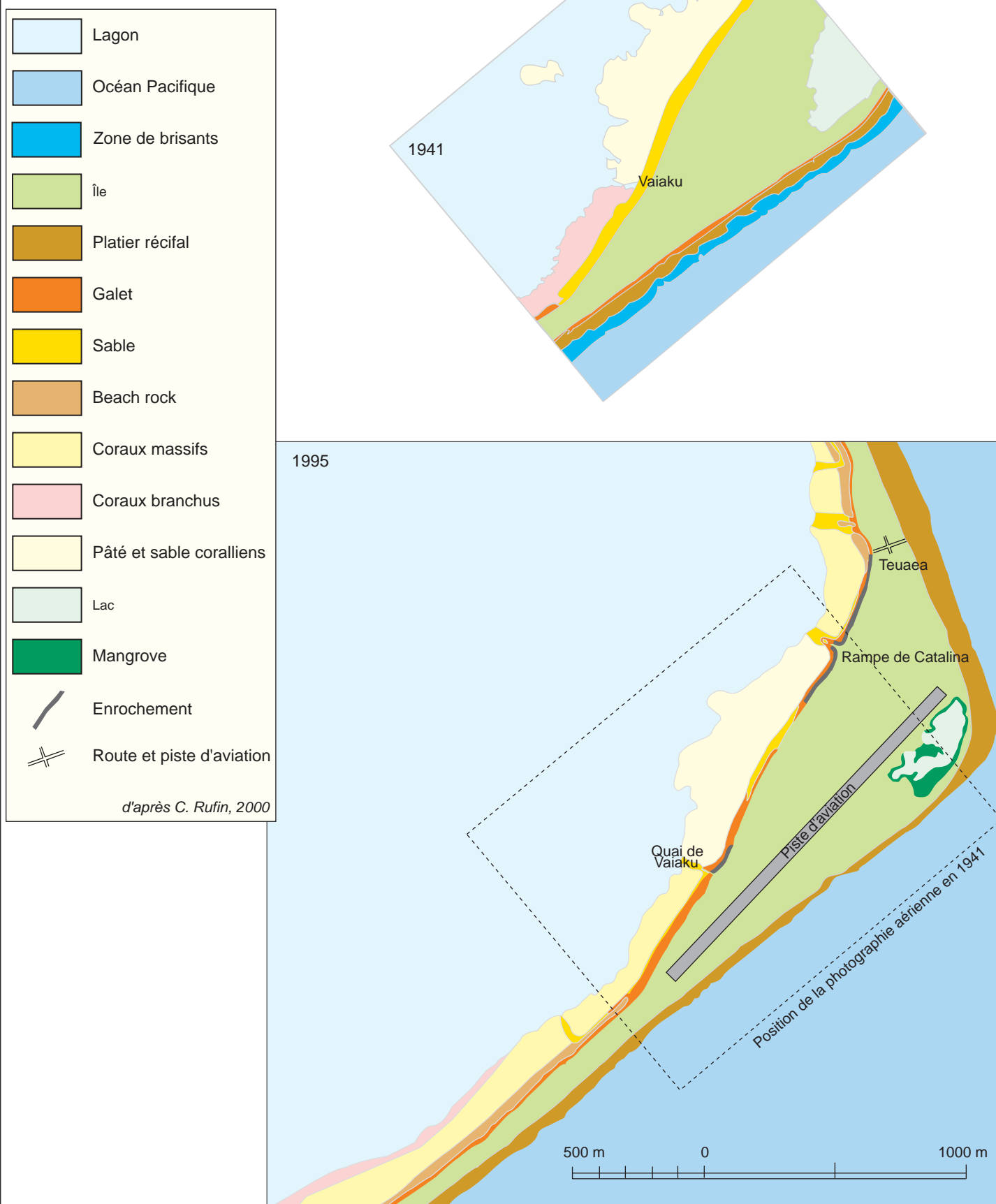


Figure 85 : Inventaire des formes de l'île de Fongafale, atoll de Funafuti



D'après Xue et Malologa, 1995 ; Rufin, 1999

Figure 86 : Evolution du littoral lagonaire de l'île de Fongafale (atoll de Funafuti) par photointerprétation entre 1941 et 1995



voie de démantèlement. La présence de galets de différentes couleurs (gris, blanc) dans l'édifice permet de mesurer sa stabilité. Ainsi, au plus proche de la ligne de végétation, s'observent des galets de couleur grise montrant une certaine permanence de l'édifice alors que, sur la pente, les galets de couleur blanche indiquent une mobilité constante. Les profils réalisés en 2001 nous permettent de constater que le cordon est en phase d'érosion notamment par le profil concave qu'il adopte.

4.3. Le beach rock : archive de l'évolution

L'utilisation du terme de beach rock plutôt que grès de plage est liée à la différence de composition entre ces deux lithifications. Sur nos terrains d'étude, la première dénomination est à retenir car les ciments rencontrés sont non seulement composés de fractions sableuses mais également de sédiments comme les galets, voire par des gros blocs qui peuvent être issus d'une pluri-cimentation des éléments. Les dépôts lithifiés correspondent généralement aux composants sédimentaires de la plage adjacente. Ainsi, les gros blocs sont représentatifs des éléments d'un ancien beach rock fracturé, comme dans le cas des îles de Rasfari et de Fongafale où leur présence a déjà été évoquée.

Ces dépôts subhorizontaux ont été signalés depuis plus d'un siècle sur les littoraux de la région indo-pacifique (Darwin, 1889 *in* Montaggioni L.F. et Pirazzoli P.-A., 1983). Leur répartition géographique, lorsqu'il s'agit de beach rock à cimentation exclusivement carbonatée, est intimement liée à celle des récifs coralliens (Guilcher A., 1961).

Il s'agit de sédiments de plage déposés au sein de la zone intertidale, souvent dans sa partie supérieure, et cimentés les uns aux autres par du carbonate de calcium (Dalongeville R. et Sanlaville P., 1983). Ils ont la particularité de se créer en-dessous de la plage actuelle. Certains attribuent leur formation à une cimentation du sédiment de plage en quelques mois (Hopley D., 1982) ou en quelques dizaines d'années (Emery *et al.*, 1954 *in* Neumeier U. *et al.*, 2000). Pour d'autres, son élaboration peut nécessiter jusqu'à plusieurs siècles (Dalongeville, 2001) entre le temps de dépôt des sédiments constitutifs de la plage, la progradation, la cimentation-gestation jusqu'à la mise à jour. Les conditions extérieures comme le pourcentage d'humidité, la salinité de l'eau de mer... vont également jouer un rôle dans la vitesse de cimentation. La formation du ciment reste toutefois sujette à débat. Si certains envisagent une précipitation de l'eau douce (calcite), d'autres penchent pour une précipitation de l'eau salée (aragonite) ou une formation organique (action microbienne ou algale) (Hopley D., 1982), alors que d'autres encore considèrent sa localisation comme étroitement liée à la structure et à la dynamique de la nappe d'eau douce.

Le beach rock est constitué de dalles litées, avec un pendage en direction de la plus grande pente et un escarpement face à l'île végétalisée qui n'est pas sans nous rappeler la forme de cuesta. Ces strates sont extrêmement fines car elles reflètent les fluctuations saisonnières du niveau moyen de la mer qui est, dans le cas de nos archipels, de faible amplitude. Sur le littoral de Rasfari (cf. Figure 87), on peut

Figure 87 : Le littoral de l'île de Rasfari (Maldives), opposition de façades



Côte océanique : disposition de dalles successives de beach rock avec des éléments grossiers démantelés, montrant la vigueur océanique et une certaine ancienneté de l'édifice.



Côte lagonaire, vue depuis le sud-est de l'île. Le placage sableux est fin mais présent sur le milieu et haut de plage. Au niveau du bas de plage, on note la présence de dalles de beach rock légèrement inclinées en direction du lagon. On devine également des dalles sous-marines, témoignant de l'extension passée de l'île.

identifier différents niveaux de beach rock dont le premier a été taillé en microfalaise, pour laisser place à la cimentation d'un second niveau, lui-même taillé en microfalaise ...

Si les affleurements de beach rock possèdent la même structure sédimentaire que la plage actuelle, les zones cimentées, longuement exposées, peuvent montrer des profils et des formes différentes dûs à des processus chimiques, biologiques, mécaniques. A l'échelle de ces îles, il est plus convenable de parler de microformes. Elles sont généralement bien marquées sur les côtes exposées comme, par exemple, sur la côte occidentale de l'île de Rasfari et décroissent sur les côtes abritées comme sur sa côte orientale où les dalles apparaissent lissées. Sur une côte exposée, l'agitation des eaux facilite l'abrasion, les formes de dissolution sont plus développées (Trudgill S. T., 1976), et ceci est d'autant plus vrai que les eaux sont plus chaudes (Guilcher A., 1953).

L'observation de différentes dalles de beach rock nous a permis d'individualiser des formes d'érosion multiples allant du millimètre au centimètre. D'après la typologie établie par A. Guilcher (1952), il s'agit de micro-lapiés, d'alvéolisations, de cuvettes d'abrasion, de cannelures (cf. Figure 88). On observe également la perforation d'organismes sédentaires comme les *Tridacna* qui sont inféodés au beach rock en place et qui sont très utiles pour effectuer des datations, comme, par exemple, dans l'île de Fulhadhoo, pour laquelle nous attendons les résultats.

Le beach rock peut être utilisé, dans des secteurs géographiques à faible marnage, comme un indicateur de niveaux marins antérieurs (Pirazzoli P.A., 1996), même si des incertitudes altimétriques subsistent. Ainsi, sur l'île d'Hulhudhoo, nous avons pu mettre en évidence la présence de dépôts sédimentaires lités en position très nettement supérieure au niveau relatif, que nous attribuons au positionnement d'un paléoniveau marin mi-holocène.

Les dalles de beach rock constituent également de bons indicateurs de migration des îles. En effet, lorsque ces dernières subissent l'influence d'agents hydrodynamiques, le beach rock marque leurs positions antérieures. Il permet ainsi de nous renseigner sur la santé morphologique des îles car il est affleurant en période d'érosion. Les observations que nous avons menées sur les séries de photographies aériennes de 1969 (observations menées sur 921 îles) et de 1999 (observations menées sur 939 îles) nous ont permis d'analyser leur distribution sur certains secteurs insulaires (cf. Figure 89). Alors qu'en 1969, 324 dalles étaient identifiées, la présence en 1999 de 825 dalles montre une nette augmentation du beach rock. En effectuant cette observation quantitative, nous souhaitons voir si une direction majeure d'affleurement se dégageait entre 1969 et 1999. La tendance générale montre une présence plus marquée de dalles de beach rock sur les côtes est et ouest des îles, correspondant aux grandes directions des moussons maldiviennes, et cela pour les deux séries. Toutefois, des secteurs d'affleurement peu marqués en 1969 apparaissent de façon soutenue en 1999 comme les secteurs ENE, ESE, SSW, WSW. S'agit-il d'une tendance érosive liée aux modifications des agents intervenant sur la dynamique littorale ou d'une migration de l'ensemble insulaire ? L'observation des photographies aériennes non recalées ne permettant pas d'effectuer une comparaison en XYZ, seule la juxtaposition de plusieurs couples de photographies peut dégager des tendances. Ainsi, si

Figure 88 : Exemples de microformes



Cannelure d'érosion dans le beach rock occidental de l'île de Rasfari (atoll de Kaafu)



Cuvette d'abrasion dans une dalle de beach rock dans l'île d'Embudhoo (atoll de Maalhosmadulu nord)

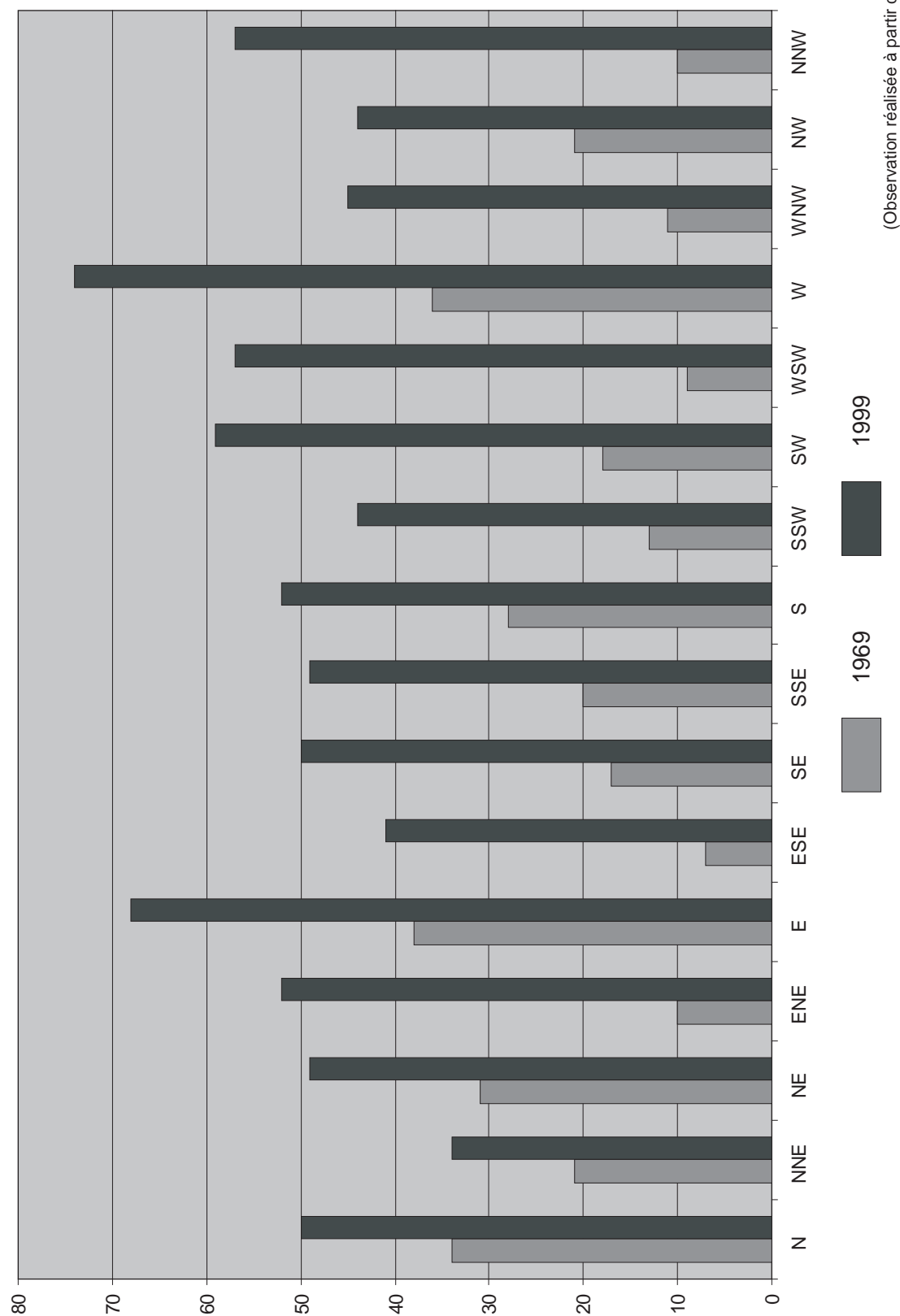


Île de Rasfari (atoll de Kaafu) : formes d'alvéolisation à la base des beach rocks de la côte méridionale

Île d'Hulhudhoo (atoll de Maalhosmadulu sud) : formes d'alvéolisation - structure en nids d'abeille



Figure 89 : Evolution du beach rock par photointerprétation entre 1969 et 1999 dans l'archipel des Maldives



l'affleurement du beach rock est connu pour être le témoin de l'érosion des côtes, sa disparition sous des sédiments peut également indiquer la même disposition. Il faut donc compléter l'observation par une analyse plus poussée de l'évolution morphologique de l'île, sur le littoral de laquelle le beach rock peut avoir une influence notable en modifiant le transit sédimentaire au sein d'un platier, en accentuant l'érosion à la côte ou en agissant comme une barrière protectrice pour cette dernière. La mise en évidence des dalles de beach rock marque un épuisement du stock sédimentaire disponible. Cette raréfaction semble récente, puisqu'en 1969 les dalles étaient encore recouvertes par du sable.

Les beach rock et les conglomérats coralliens localisés sur les îles basses peuvent leur assurer une stabilité en jouant le rôle de barrière protectrice face aux houles déferlantes (Aalbersberg *et al.*, 1991 ; Woodroffe C.D., 1989 ; Pirazzoli P. A., 1998). Ceux qui sont localisés sur les îles basses coralliennes peuvent servir à la fois de protection aux vagues déferlantes mais également à la remontée du niveau de la mer. Si l'on considère qu'un conglomérat corallien ou que des niveaux de beach rock peuvent jouer le rôle de barrières protectrices naturelles face à une élévation du niveau de la mer, l'avenir des îles maldiviennes, qui en sont pauvres, ne peut que susciter un certain pessimisme.

Nous avons pu trouver dans le beach rock de l'île de Rasfari des bouts de poteries, correspondant certainement à une jarre. Incrustés dans le beach rock, ils peuvent avoir deux origines, d'après Mme Ibrahim du *National Centre for Linguistic and Historical Research*. La première correspondrait au temps des grandes traversées transocéaniques car les bateaux voyageant à cette époque faisaient escale dans des îles maldiviennes pour effectuer des approvisionnements en eau et en nourriture. L'autre se rapporterait au rôle d'île touristique qu'elle revêtait durant le règne des sultans. Rasfari (ou rasfaree) vient du maldivien, *rasgefaanu* qui signifie roi et *fari* beau. L'île de Rasfari devait être une île de repos et de plaisir pour les sultans ou hauts dignitaires du régime, ce qui démontre l'ancienneté de l'accumulation.

La présence de hauts pandanus dans la partie nord de l'île suggère que l'accumulation s'est développée d'après une dérive littorale nord-nord-est – sud-sud-ouest. L'épaisseur des sols dans la partie nord semble également corroborer cette hypothèse.

L'uniformité dans la présence de beach rock tout autour de l'île montre toutefois une extension beaucoup plus importante de cette dernière par le passé. Ceci permettrait également de supposer la présence d'une importante lentille d'eau douce sous-jacente. D'après P.E. Cloud (1952) et H.J. Wiens (1962 in Roy P. et Connell J., 1991), les îles au-dessus de 1,5 ha et 200 m de diamètre ont toutes des lentilles d'eau douce flottant sur l'eau salée. D'après C.W. Fetter (1972), le volume d'une lentille d'eau douce est proportionnel à la largeur et la surface de l'île.

4.4. L'origine des accumulations sédimentaires

Si les accumulations sédimentaires peuvent être de différentes origines, elles sont toutes influencées d'abord par le type de récif, sa taille et sa forme, son orientation, son exposition face aux houles du large, sa localisation par rapport à d'autres récifs, mais aussi par l'apport sédimentaire disponible, les conditions climatiques et océaniques environnantes...

Quelle que soit la morphologie considérée, l'apport des grains carbonatés alimentant les îles ou les récifs se fait par fragmentation mécanique des coraux et des *Halimeda* ainsi que par l'action biologique d'éponges, de poissons et d'oursins.

Nous recensons ainsi dans la littérature scientifique trois origines majeures de l'édification insulaire, qui peuvent être implicitement liées et qui peuvent expliquer la morphologie actuelle de certaines îles : il s'agit d'une origine eustatique, d'une origine paroxysmale et d'une origine météo-océanique.

4.4.1. Une construction eustatique

L'influence des variations eustatiques sur la formation des accumulations sédimentaires a été rapidement envisagée par les scientifiques. Ainsi, J.S. Gardiner (1903) considère que les îles naissent après un abaissement du niveau marin et réitère ses propos en 1931 où il considère que « le changement négatif du niveau de la mer est la cause dominante de la formation des îles dans les atolls ». Il ajoute que les îles situées sur la ceinture équatoriale Indo-Pacifique sont nées durant un bas niveau marin, situé entre « huit et dix pieds³⁰ ». Kuenen (1933), quant à lui, estime que « la plupart des îles sont le résultat de l'émergence de leurs platiers. Sans ce mouvement négatif, leur nombre sur le récif serait légèrement inférieur ». Pour J.C. Schofield (1977a ; 1977b), « une baisse significative de 2,4 m depuis 2 760 BP a été d'une importance majeure dans la croissance récifale et insulaire des Tuvalu. Les îlots ont été construits avec le sable pris depuis les marges peu profondes du lagon comme un résultat direct de cette régression », tandis que Woodroffe (1999 *in* (Ali M., 2000)) suggère que la baisse du niveau de la mer « apparaît comme avoir eu une petite influence sur le modèle d'accrétion des îles ». Pourtant, d'après le modèle d'évolution insulaire qu'il a proposé pour l'archipel des Cocos (Woodroffe C.D. et Mclean R.F., 1994), il apparaît que le platier récifal fossile situé à environ un mètre au dessus du niveau marin actuel a pu servir de base à l'édification des îles au cours des derniers 3 000 ans. Des îles comme Hulhudhoo, Goidhoo, Fulhadhoo, dans l'archipel des Maldives et Fongafale, dans l'archipel des Tuvalu portent les témoins d'un niveau supérieur impliquant que leur construction s'est faite *a minima* à cette période.

³⁰ entre 2,4384 m et 3,048 m

Une accumulation sédimentaire, quelle qu'elle soit, ne peut se créer qu'en période de stabilité du niveau de la mer. C'est d'ailleurs au cours de cette période que les récifs se sont développés dans leur position actuelle et que les îles se sont formées sur leurs platiers. Ceci pourrait nous laisser supposer qu'à chaque phase de stagnation du niveau de la mer lors de la remontée postglaciaire, des îles auraient été susceptibles de se créer, constituant ainsi l'assise de certaines îles actuelles.

4.4.2. Une construction météo-océanique

Une fois que le niveau marin s'est stabilisé, les forces se mettent en action afin de favoriser le dépôt sédimentaire en vue de la création d'une île.

Pour C. Darwin (1842 *in* Darwin C., 1962), les îles se forment par accumulation de matériaux issus des vents. Pour Sewell (1936 *in* Ali M., 2000), la migration des îles à travers le platier récifal semble se faire en direction du lagon et les matériaux qui alimentent les îles proviennent également de la surface récifale. Comme le soulignait J.S. Gardiner (1903), les vents d'ouest accompagnés par les houles sont capables de faire naître une île mais peuvent également la faire disparaître.

Quoi qu'il en soit et d'après D.R. Stoddart et J.A. Steers (1977 *in* Ali M., 2000), le renversement des vents de mousson rend compliquée la localisation des îles sur les plates-formes récifales maldiviennes.

Dans l'archipel des Tuvalu, comme pour d'autres atolls du Pacifique (Guilcher A., 1967), il existe une dissymétrie dans la répartition des îles, due à des contrastes d'origine climatique entre la côte exposée au vent et la côte sous le vent des récifs. Ainsi, dans les atolls de Funafuti, Nukulaelae, Nui, Nukufetau, on note la présence de nombreuses îles, continues ou discontinues sur leurs façades orientales et peu sur leurs façades occidentales. Généralement, les récifs situés sur le platier sous le vent sont ennoyés sous quelques centimètres d'eau. Toutes les îles localisées sur la partie orientale des atolls sont des accumulations de sables et de fragments coralliens qui reposent, par endroits, sur un socle constitué par des matériaux calcaires variés, indurés, qui apparaissent sur l'estran sous forme d'affleurements rocheux plus ou moins lapiazés (cf. 3.2.1.3).

L'originalité dans la création de ces accumulations sédimentaires est liée à la présence, tout autour de ces dernières, d'une barrière récifale. Pour certain (Hopley D., 1982), l'île se crée de façon aléatoire, dès « qu'il y a une zone suffisante pour permettre son développement [...] sur des récifs inférieurs à 1 km² ». La naissance d'une île n'est alors plus contrôlée ou modélisée mais se fait dès que les conditions, comme la houle, les courants, les apports sédimentaires... sont concomitantes. L'importance de micro-dépôts dans l'archipel conforte cette idée.

D'après les observations que nous avons faites sur le terrain, l'analyse des photographies aériennes et les références bibliographiques (Hopley D., 1982 ; Gourlay M.R., 1988) que nous avons consultées,

notamment sur les cayes de la Grande Barrière de Corail, cette « spontanéité » dépend, en fait, de nombreux paramètres externes.

Les actions hydrodynamiques marines sont des facteurs déterminants dans la dynamique littorale des accumulations sédimentaires actuelles, même en domaine microtidal. Les deux archipels sont soumis aux marées de type semi-diurne, s'organisant suivant deux phases de flot et de jusant en un peu plus de 24 heures. La hauteur des marées dans l'archipel des Maldives varie latitudinalement de 0,7 m au nord à 1 m dans le sud de l'archipel ou de 0,3 m à 1 m pour D.R. Stoddart (1971) qui qualifie ces espaces de zones à micro-marée. Les données sur les courants de marée sont extrêmement rares pour les deux archipels. Nous savons qu'au large des îles, leurs valeurs oscillent dans l'archipel maldivien entre 0,3 et 0,7 m/s alors que, à leur approche, ils atteindraient 2 m/s et que dans les passes, ils peuvent être plus puissants (Ministry of Economic Affairs. et Unep, 1989).

La hauteur moyenne des vagues se brisant sur les récifs est généralement comprise entre 1 et 2 m et atteint exceptionnellement plus de 3 m (Ministry of Economic Affairs. et Unep, 1989). Dans l'archipel Tuvaluan, les vagues oscillent entre 1,6 et 1,9 m (Barstow S.F. et Patiale M., 1992), mais peuvent atteindre 5 m, comme durant le cyclone Uma en 1987, voire jusqu'à 10 m dans l'océan Pacifique sud-ouest d'après Barstow S.F. et Haug O. (1994).

La situation des archipels dans de vastes bassins océaniques fait qu'ils sont touchés par des houles longues nées lors de tempêtes ou de cyclones lointains.

Des observations qui précèdent, découlent les facteurs qui conditionnent la création d'une île : (1) il d'abord faut que les vagues qui se brisent sur la bordure récifale soient suffisamment puissantes pour ne pas perdre en énergie. Des auteurs (Anonyme *in* Hopley D., 1982, 1994) ont estimé qu'au-dessous de 25 nœuds de vent, les vagues sont incapables de transporter des sédiments au sein d'un platier récifal durant la basse mer.

La barrière récifale peut à la fois freiner les vagues qui ont pénétré dans le platier et concentrer leur énergie en un point précis de ce platier, le point nodal. En complément, il convient de noter que, plus la structure atollienne est réduite, plus l'intensité des vagues est uniforme lors de leur pénétration sur l'ensemble épirécifal.

Quand les vagues atteignent le platier, certaines sont diffractées vers des zones de calme, alors que d'autres gagnent la côte sous le vent des récifs où elles échouent. En effet, les vagues peuvent être freinées par les éléments coralliens présents et être réfractées lors de leur passage à travers le platier. Ainsi, les phénomènes de diffraction et de réfraction des vagues sur les plates-formes récifales jouent un rôle important dans le développement insulaire. La forme de la plate-forme récifale va avoir une influence importante sur la morphologie, la stabilité et la position de l'accumulation.

(2) La production des sédiments au niveau du récif doit être importante car ce sont ces éléments et indirectement ceux accumulés sur le platier qui vont permettre d'approvisionner l'île en matériaux.

(3) L'autre facteur primordial de la création d'une île est la morphologie de la construction récifale. La taille, la forme ainsi que l'orientation du récif sont cruciales dans la mise en place d'une île. Une accumulation stable, située sur la face sous le vent du récif, est généralement associée à un récif lenticulaire (ovale ou elliptique) dont le plus grand axe est aligné sur la direction des vagues dominantes. D'après M.R. Gourlay (1988), les récifs lenticulés assurent une plus grande stabilité à l'accumulation sédimentaire que les récifs circulaires (cf. Figure 90). Ces derniers sont instables du fait que le point de convergence des vagues se déplace sous l'effet d'un changement dans leur direction ou dans leur périodicité.

Sur la côte au vent, on peut observer la présence d'une accumulation de galets ou de sable qui se développe en direction de la côte sous le vent suivant la direction du plus grand axe du récif. Cette localisation semble être associée à la zone d'interférence créée par les vagues pénétrant au niveau du récif ou séjournant dans le platier.

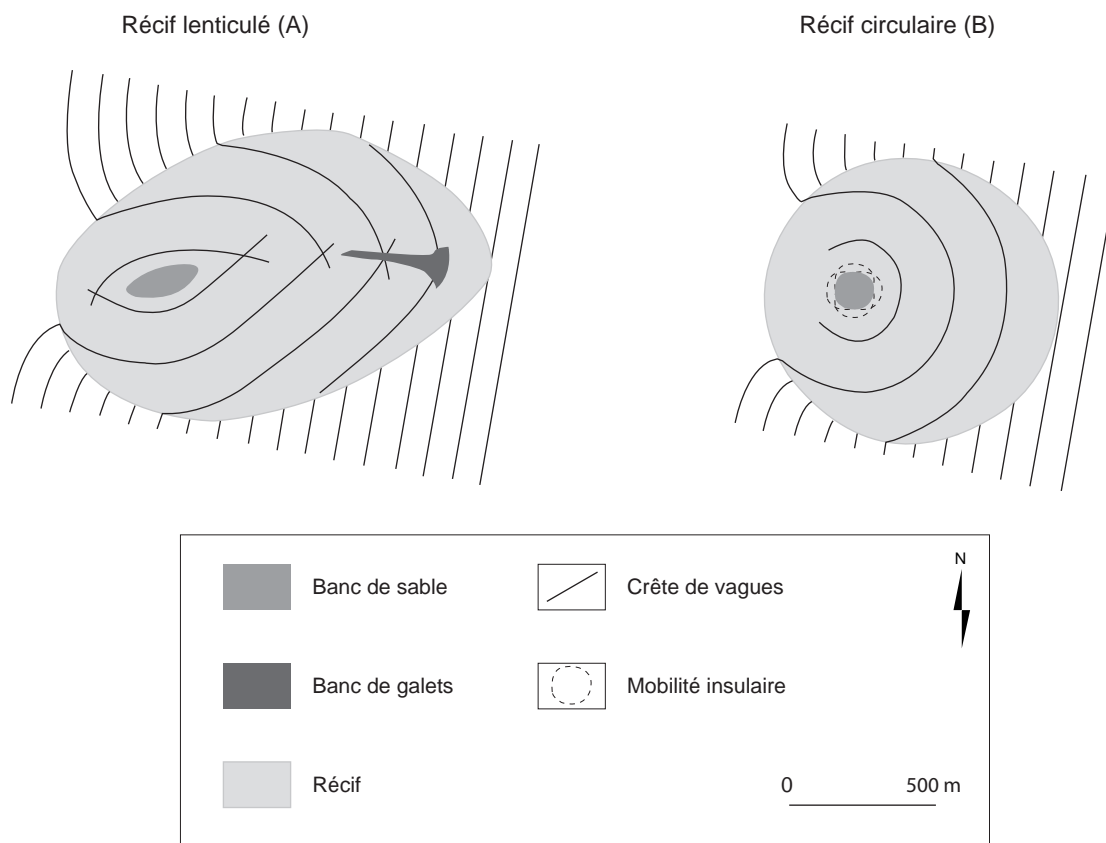
B.M. Richmond (1992) décrit une forme particulière d'île, localisée sur la côte au vent, qui est liée à la morphologie initiale du récif et à l'interaction de vagues unidirectionnelles. Localisée sur la courbure convexe du récif, qui exerce du fait de ses irrégularités un effet stabilisateur, elle adopte une morphologie en « boomerang » comme l'île de Fongafale et prochainement celle de Funafara dans l'atoll de Funafuti.

Cette morphologie particulière peut être expliquée de deux façons. Dans le premier cas, les dépôts s'accumulent initialement dans la partie la plus large du platier récifal, créant ainsi une accumulation située dans la convexité du récif. De cette zone d'accumulation principale, deux bras vont se développer en direction de la côte sous le vent. Dans le second cas, deux îles, localisées suivant deux orientations différentes au sein d'un même récif, convergent pour former une accumulation centrale localisée dans le coude du récif. Si l'observation actuelle de l'île de Funafara (cf. Figure 71) tend à privilégier la seconde hypothèse, le développement du premier exemple apparaît plus logique face à la direction préférentielle des alizés. La présence actuelle d'une importante flèche de sable au débouché de la fausse passe, qui tend à combler le lagon de la partie sud ouest de l'atoll de Funafuti, montre l'important apport sédimentaire réalisé depuis l'océan.

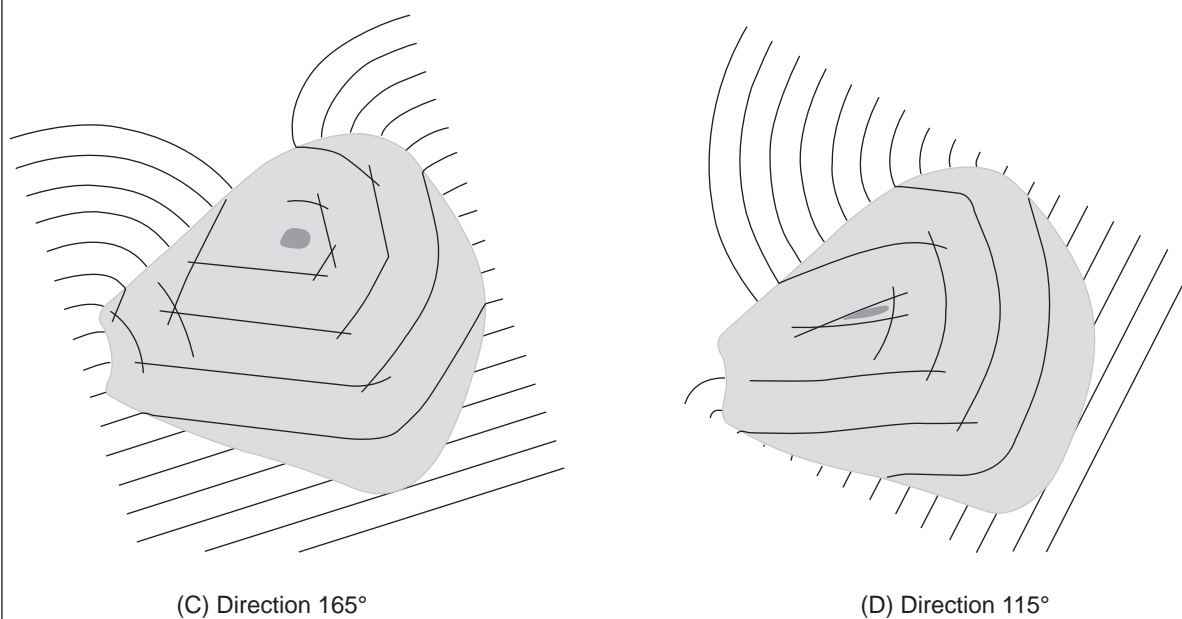
Les petites structures récifales sans lagon sont plus riches en formations sédimentaires que celles avec lagon car ce dernier constitue un piège à sédiments important. En effet, ces formations planes sont alimentées beaucoup plus rapidement que des récifs très larges. Les vagues qui pénètrent la barrière récifale et qui traversent un platier limité arrivent avec suffisamment d'énergie pour faciliter le dépôt des sédiments. Dans le cas des grandes structures, l'énergie de la vague, qui peut être trop courte par rapport à la taille de la plate-forme, est dissipée avant même d'atteindre le point de

Figure 90 : Facteurs influençant la morphologie des formations sédimentaires
(d'après Gourlay, 1988)

D'après la morphologie du récif :



D'après la direction des vagues :



dépôt. La puissance des vagues est donc primordiale dans le cas de nos archipels puisqu'elles conditionnent ou non l'édification d'une île.

Aux Maldives comme aux Tuvalu, les récifs peuvent être longs mais sont peu développés en largeur. Une fois formées, ces accumulations sont extrêmement sensibles aux facteurs climatiques et/ou océaniques externes. On peut observer cinq échelles de temps impliquant des modifications dans la morphologie des îles notamment par des changements dans la direction des vents dominants. Il s'agit de l'échelle annuelle, l'échelle inter-annuelle, l'échelle décennale, l'échelle séculaire, l'échelle paroxysmale et l'échelle ENSO.

4.4.3. Une construction paroxysmale

Lorsque l'on évoque les mots de tempêtes ou de cyclones, nos références les associent rapidement à des érosions côtières importantes, des submersions, des dommages matériels considérables et des morts. S'il est vrai qu'ils peuvent être des agents de perturbations considérables sur le littoral, ils peuvent être également des constructeurs sédimentaires extrêmement importants pour des systèmes insulaires. Pour F.G. Bourrouilh-Le Jan et J. Talandier (1985), les matériaux coralliens grossiers, qui constituent la base des édifices insulaires de l'océan Pacifique, sont tous des éléments accumulés lors de périodes de tempêtes et/ou de cyclones. Ils se situent préférentiellement sur les façades au vent des récifs et sont qualifiés de traînées cycloniques. L'effet sédimentologique d'un événement exceptionnel comme un cyclone peut provoquer, sur le platier, la formation d'une laisse cyclonique située en zone supratidale et composée de dépôts sédimentaires variés comme des blocs simples ou cyclopéens, des galets, du sable. L'accumulation de l'ensemble de ces éléments déterminera non seulement la morphologie issue de la résultante des houles, lors de l'événement, mais également la direction du récif.

L'exemple du cyclone Bébé qui a frappé l'ensemble de l'archipel des Tuvalu en octobre 1972 et plus intensément l'atoll de Funafuti reste l'événement climatique le plus morphogène qu'a connu l'archipel, et ses répercussions sont encore visibles sur la côte au vent du platier de l'atoll. En effet, en une nuit un rempart littoral de 19 km de long, 3,5 m de haut et 37 mètres de large s'est constitué sur la façade orientale du récif. Le volume sédimentaire accumulé a été estimé à $1,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Maragos J.E. *et al.*, 1973 ; Baines G.B.K. *et al.*, 1974 ; Baines G.B.K. et Mclean R.F., 1976).

Les éléments constituant cette accumulation corallienne, comme les *Porolithon*, les *Acropora*, ont été arrachés à la pente externe jusqu'à 20 m de profondeur. En effet, le socle de l'atoll a été soumis à une érosion mécanique de sa bordure par l'arrachage de blocs cyclopéens sur la pente externe, ainsi qu'à la fracturation du rebord de son platier. Ce type d'événement, extrêmement dommageable pour l'ensemble frontorécifal, a été *a contrario* très profitable pour l'ensemble épirécifal.

Cette accumulation d'éléments non consolidés est séparée du trait de côte par une retenue d'eau épirécifale peu profonde (cf. Figure 91 - annexe) et assure à l'île une défense naturelle contre les attaques océaniques. Depuis 1972, l'atoll de Funafuti a vécu des conditions climatiques normales qui ont fait évoluer le profil convexe du rempart en un profil concave, lié à la combinaison de l'érosion naturelle et anthropique. Si, dans certains secteurs de la façade orientale de l'atoll, on peut encore observer les restes de l'accumulation, même s'ils ont migré en direction de l'île, dans d'autres secteurs ils ont totalement disparu et se confondent avec le cordon de galets initialement présent.

Cet héritage sédimentaire exceptionnel ne semble pas être un fait isolé dans l'archipel des Tuvalu. Les expéditions scientifiques menées dans l'atoll de Funafuti au début du XX^e siècle avaient déjà mis en évidence un important cordon de galets dans l'île de Fongafale, qu'elles avaient estimé daté du XIX^e siècle. En 1991, B. Aalbersberg et J. Hay identifient sur certaines îles de l'archipel les témoins d'un important cyclone constructeur datant du XIX^e siècle. Peut-être s'agit-il de celui de 1886 qui a été, d'après la responsable du service météorologique de Funafuti, le cyclone le plus dévastateur après le cyclone Bébé. On peut imaginer que l'île de Fongafale est née de l'accumulation de cordons littoraux successifs comme cela est également le cas pour les îlots de Kapingamarangi dans les Carolines où Wiens (*in* Huetz de Lempis., 1984) a identifié trois cordons de tempêtes ou encore pour les atolls de Mururoa et de Raroia dans l'archipel des Tuamotu, et de l'atoll de Bikini dans les Marshall.

T. Bayliss-Smith (1988) avait également montré pour l'atoll d'Ontong-Java que le cyclone avait provoqué une érosion importante des côtes, mais qu'inversement il avait été capable d'apporter des matériaux pour leur reconstruction. Cet auteur a d'ailleurs estimé qu'au cours du mi-Holocène, dans les Salomon, les tempêtes avaient été plus nombreuses et plus intenses qu'à l'heure actuelle permettant aux îles de croître avantageusement.

B.M. Richmond (1992) considère, quant à lui, que les îles « sont composées majoritairement de débris de carbonates issus des tempêtes, provenant du récif adjacent. [...] Les îles se construisent par des éléments issus de tempêtes et ont un équilibre précaire entre les forces constructrices des vagues, des courants, de la bioérosion et de la dissolution chimique avec les efforts que fait le récif pour produire des sédiments carbonatés ».

Dans l'archipel des Maldives, les tempêtes actuelles peuvent influencer sur la morphologie des îles, mais rares sont celles qui ont pu en créer comme dans l'océan Pacifique. D'après les archives que nous avons pu consulter (Maniku H. A., 1990), seules les îles d'Aahuraa, dans l'atoll de Shaviyani, et de Kashidhoogiri, dans l'atoll de Moresby, ont été créées respectivement par les tempêtes du 9 janvier 1955 et du 18-19 juin 1987. Toutefois, après analyse des cartes, seule l'île de Kashidhoogiri existe encore. Soit l'île Aahuraa a disparu, soit elle a été rebaptisée d'un autre nom maldivien.

Quelques îles visitées lors de nos missions, comme celle de Maamaduvvari dans l'atoll de Maalhosmadulu sud ou l'île de Vilingili dans l'atoll de Malé nord, nous laissent envisager une origine tempétueuse. En effet, la présence de deux importants dépôts de galets dans la partie sud-sud-est, sous la végétation insulaire actuelle, séparés l'un de l'autre par une dépression, suggère des accumulations

tempétueuses successives adossées à l'île initiale. La présence d'un conglomérat corallien sur le platier récifal externe, en avant du trait de côte actuelle, contribue à renforcer l'idée d'une zone extrêmement battue par les vagues de tempête, indiquant la trajectoire des anciennes tempêtes (Pirazzoli P.A., 1998). Seuls, les travaux de H.N. Siddiquie (1980) sur l'atoll de Minicoy, dans les Laccadives, ont permis de montrer que certaines de ces îles ont été formées à partir de vagues de tempêtes venant de l'est.

Si les îles que nous étudions se situent sous des latitudes où la cyclogénèse est réduite, elles peuvent être, comme dans le cas des Maldives, soumises à l'influence de houles longues nées sous de plus hautes latitudes et peuvent avoir été touchées ponctuellement par ces événements paroxysmaux. Les vagues nées des cyclones et/ou des tempêtes peuvent également faire disparaître des îles. Ainsi, en 1997, lors du passage du cyclone Keli, l'île de Tepuka vilivili, située sur la bordure occidentale de l'atoll de Funafuti, a disparu. D'après les récits qui nous ont été rapportés³¹, les cocotiers et les pandanus ont été déracinés puis emportés par les vagues. A l'heure actuelle, il ne reste plus qu'un banc de sable et des fragments coralliens émergés à marée haute, témoignant de la localisation antérieure de l'île.

4.4.4. Histoires des îles : typologie insulaire

Les forces qui ont initialement créé des îles peuvent intervenir de façon récurrente, ce qui permet de dégager des modèles de construction puis d'évolution des îles. B.M. Richmond (1992) a été l'un des premiers à élaborer une typologie insulaire en fonction des différents stades de leur développement morphologique (cf. Figure 92 - annexe).

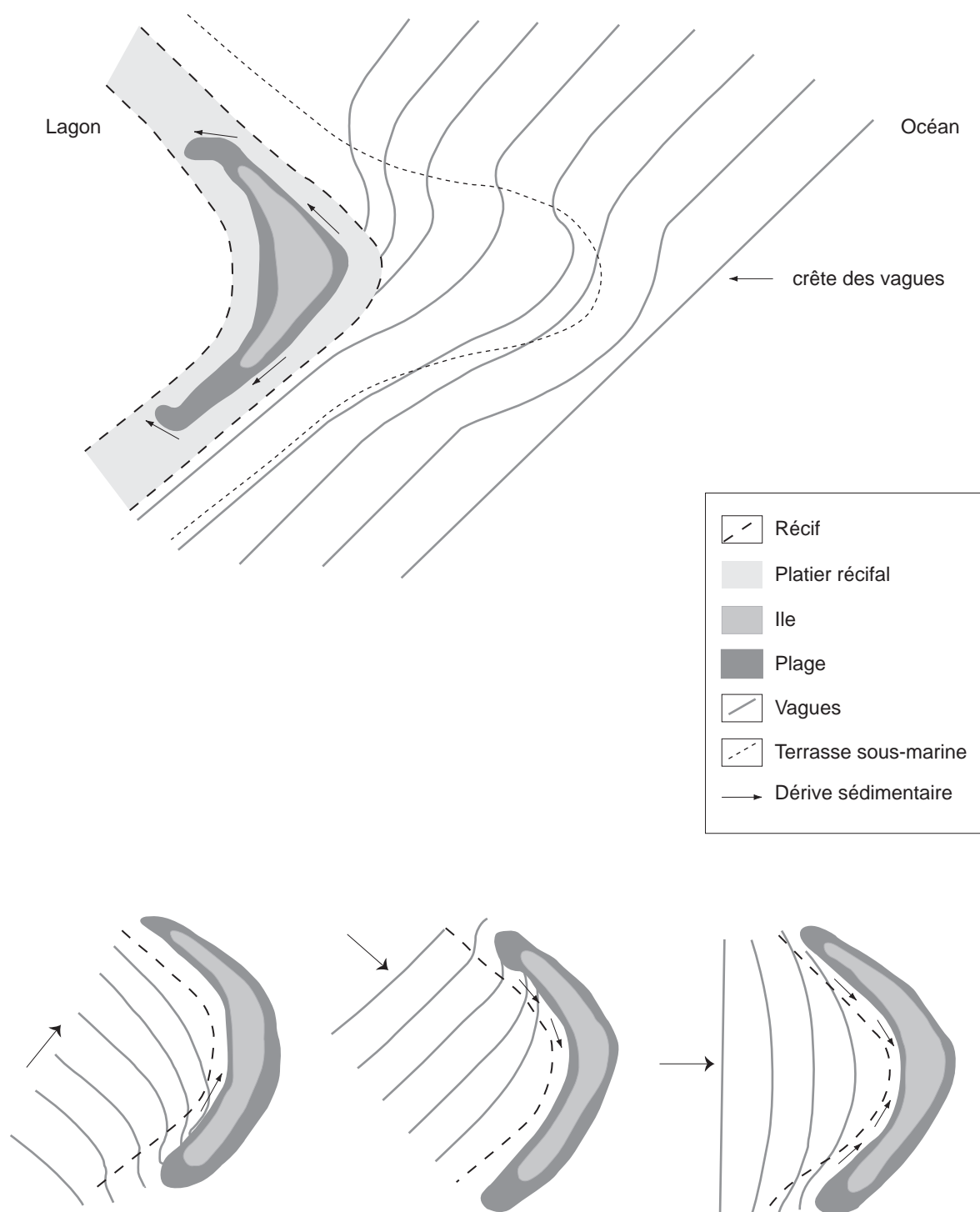
Le type I, correspondant au premier stade, se traduit par l'accumulation de sédiments sur la côte sous le vent du récif. Il s'agit alors d'une accumulation mobile, instable, pouvant migrer au gré des vagues et des courants à partir de son point central de dépôt (cf. Figure 93 -annexe).

Lorsque l'île est suffisamment stable (cf. Figure 94), la végétation pionnière s'implante et permet à l'accumulation de se fixer (type II). Aux Tuvalu, l'île de Funafara peut être prise comme un exemple de stabilité par rapport à Fongafale.

Le type III traduit toute accumulation sédimentaire localisée au vent d'un platier. Aucune distinction n'est faite quant à la composition sédimentologique ou biogéographique de l'accumulation. Le type IV est plus évolué. Il comprend une levée de galets au niveau de la côte sous le vent ainsi qu'un rempart de galets composés d'éléments accumulés au fur et à mesure du temps sur la côte au vent. Le développement insulaire est un peu plus marqué car, dans ce type, il peut y avoir une zone de

³¹ Entretien avec Semese Alefaiao (2001) – Ministry of Natural Resources and Environment

Figure 94 : Construction insulaire de type II. L' exemple de l'île de Fongafale



d'après Richmond, 1992

mangroves peut séparer le rempart de blocs situé en avant de la côte et l'accumulation sédimentaire *stricto sensu* (cf. Figure 95 - annexe).

Le type V est une île évoluée, ayant une histoire morphologique plus complexe. Cette île possède un sol noir épais, des rides de plage, une morphologie karstique, des dunes... Elle occupe généralement les trois quarts de la plate-forme récifale.

Ces modèles ont connu des évolutions eustatiques, que B.M. Richmond (1992) envisage comme régressives, ce qui implique une construction assez ancienne des édifices.

Les îles naturelles de l'atoll tuvaluan de Funafuti sont de deux types, soit des accumulations composées de fragments coralliens associés à des sables calcaires, soit des dépôts non consolidés surmontés par des fragments coralliens cimentés qui peuvent atteindre la partie supratidale actuelle. Ces matériaux non consolidés sont des fragments qui sont amalgamés les uns aux autres par des vagues de tempête (Bourrouilh - Le Jan F.G. et Talandier J., 1985) (cf. Figure 96 - annexe).

De leur côté, les îles et les îlots des Maldives subissent le régime des vents et des houles. Leurs formes et leurs accumulations peuvent donc évoluer au cours des différentes saisons climatiques. L'îlot de sable peut, s'il n'est pas fixé par la végétation, changer d'orientation, voire de localisation au sein du récif selon les différentes saisons climatiques. Il s'agit d'une accumulation migrante qu'André Guilcher (1950) qualifiait de « convexité à orientation variable avec la saison ».

L'observation des îles, au travers de photographies aériennes, de levés topographiques, et de documents anciens nous a permis de dégager trois types d'évolution (cf. Figure 97 - annexe) :

- soit elles conservent leur taille initiale en étant soumises à une simple migration sédimentaire d'une côte à une autre. Elles sont alimentées soit par un stock hérité, localisé sur le platier, consistant en des accumulations immergées de petits fonds, visibles sur l'ensemble des clichés, soit par un stock neuf moins abondant car sa vitesse de production est plus faible, soit par un stock sédimentaire émergé qui se déplace, autour de l'île, selon les saisons.

- soit elles s'agrandissent avec un gain sédimentaire,

- soit elles se réduisent par érosion.

Trois séries d'exemples illustrent respectivement ces types d'évolution.

Les îles de Rasfari, Tepuka (cf. Figure 98 - annexe), Hulhudhoo (cf. Figure 99 -annexe), Rangali (cf. Figure 176 – annexe) conservent une forme quasi identique mais voient leur stock sédimentaire osciller entre les secteurs orientaux et occidentaux.

L'île de Makunufushi (cf. Figure 177 – annexe.) se développe à ces deux extrémités, est-nord-est et ouest-sud-ouest.

L'île de Kudadhoo, visitée en 2000 et observée par M. Ali (2000), montre une réduction de sa surface qui s'accompagne du développement d'une queue de comète et de l'affleurement de grandes dalles de beach rock.

Deux types de sédiments ont été identifiés sur ces îles : les éléments non consolidés et les éléments lithifiés. Dans le premier cas, la fraction de sédiments sableux fins dominante, elle est composée de fragments coralliens, d'Halimeda et de Foraminifères (Scoffin T.P., 1986 ; Ali M., 2000) issus du récif adjacent. Les volumes de sable actuels sont généralement de moindre importance dans l'ensemble des îles basses coralliennes du fait de la faible vitesse de fragmentation des éléments récifaux pour former ce sable mais également de la rapidité de formation du beach rock, qui se situe sous les plages actuelles. Occasionnellement, les îles peuvent aussi être constituées de fragments coralliens, de galets et de gros blocs. Dans le second cas, s'observent des dalles de beach rock, facilement identifiables par photographies aériennes, et des conglomérats comme sur l'île de Vilingili.

Le comportement sédimentaire à venir des îles en cas d'élévation avérée du niveau de la mer reste une interrogation. Les variations climatiques comme la modification des régimes de vents et des précipitations vont influencer sur l'arrangement de l'accumulation, la végétation, les beach rocks, et la quantité de l'eau souterraine. La vulnérabilité des accumulations sédimentaires sera alors à rechercher dans :

- la localisation de l'île sur la façade orientale ou occidentale de l'atoll,
- sa taille et sa forme,
- la morphologie du récif qu'elle occupe,
- la proportion du récif occupé par l'île,
- sa hauteur par rapport au niveau moyen de la mer et sa topographie,
- la nature des sédiments apportés,
- la présence ou l'absence de lithification.

Pour Aalbersberg *et al.*, (1991), plus le récif est large plus la production sédimentaire sera importante pour l'île qui en est issue. *A contrario*, les îles disposées sur des récifs isolés comme Niulakita aux Tuvalu ou Kaashidhoo aux Maldives vont être soumises à une plus forte vulnérabilité.

D'après les travaux que nous avons menés sur l'île de Rihiveli aux Maldives (Rufin C., 2002), au-delà du rôle connu de la barrière récifale, le platier récifal exerce une action déterminante dans l'atténuation de la houle. Quand il est endommagé ou absent, du fait d'un dynamitage répété, les vagues déferlent à la côte avec toute leur énergie. Ceci sera encore plus préjudiciable pour de larges récifs puisqu'une fois brisées sur la barrière, les vagues peuvent reprendre toute l'énergie nécessaire avant d'atteindre l'île, l'absence du platier ne jouant ni un rôle atténuateur ni dissipateur. Cette dernière fonction, qui influe sur la houle, est primordiale en cas d'élévation du niveau de la mer. Comble du paradoxe, le platier dynamité est utilisé pour protéger des secteurs de plage qui continuent à être attaqués.

Et si les îles basses n'étaient pas aussi vulnérables et éphémères qu'on le prétend ? Il ne s'agit pas là d'émettre une hypothèse globale qui contredirait la réalité des phénomènes érosifs constatés à travers le monde mais d'une réflexion qui procède d'observations réalisées notamment au sein de l'archipel des Maldives. Comme le montre la carte de l'évolution des îles pour l'ensemble de cet archipel, peu ont disparu, peu ont été créées récemment mais elles évoluent artificiellement ou naturellement au gré des tempêtes, des vagues, de l'histoire eustatique à laquelle elles sont intimement liées.

L'observation du comportement morphologique d'îles inhabitées montre, de leur part, une réponse assez positive à l'échelle de temps prise en compte dans notre étude, période qui peut être cependant considérée comme insuffisante lorsque l'on souhaite aborder l'évolution diachronique d'un système littoral.

Chapitre 5 – Les agents contemporains de la dynamique littorale

Si l'on envisage que les seules perturbations naturelles, la dynamique littorale ne peut qu'être modifiée par différents « forçages » : l'élévation du niveau marin, l'augmentation de l'activité cyclonique, la fréquence accrue du phénomène El Niño, qui s'accompagne d'un réchauffement et d'une stratification des masses d'eau, la modification de la circulation océanique, susceptible d'affecter la dispersion et le transport des larves coralliennes (Montaggioni, 2000), la diminution de la calcification de plus de 20 % entre 1999 et 2100 (Kleypas *et al.*, 1999³² in Montaggioni, 2000), l'élévation du niveau de la mer, estimée à 0,6 m d'ici à l'an 2100, etc.

Qu'en est-il sur nos terrains d'étude ?

5.1. Variations eustatiques

« Adieu les Maldives », « Paradis perdus », « Les Maldives en mal d'altitude » ou encore « Le réchauffement climatique n'engloutira pas les îles Tuvalu, mais... » sont quelques exemples des nombreux titres de magazines ou de journaux consacrés à ces deux territoires insulaires (cf. Annexe 2). Ces titres sont le reflet des sentiments contrastés au sein de la communauté scientifique, les pessimistes envisageant la disparition inéluctable des archipels, les optimistes niant toute évolution négative du système littoral. Le but de ce mémoire n'est pas de prendre parti pour l'un ou l'autre camp de pensée mais d'analyser objectivement les données que nous avons collectées afin de prévenir les conclusions trop hâtives tout en dégagant quelques tendances.

A la fin des années 1970 et au début 1980, les estimations de l'élévation du niveau de la mer prévoyaient des taux de remontée extravagants oscillants entre 2 m et 3,45 m au dessus du niveau actuel. Dans cette perspective, plus aucun micro-Etat insulaire n'aurait pu survivre et une partie des continents aurait été submergée. Désormais les valeurs ont été revues à la baisse. Ainsi, pour l'IPCC (in Houghton *et al.*, 1990), au cours des 100 dernières années, le niveau marin a augmenté de 10 à 20 cm.

D'après P.A. Pirazzoli (1996), les données marégraphiques de 229 stations à travers le monde, avec une proportion plus importante pour l'hémisphère nord, montrent des résultats extrêmement variés :

- 20.5 % des données montrent que l'élévation est comprise entre 0,1 et 1 mm/an,
- 13 % entre 1 et 1,5mm/an,
- 17 % entre 1.5 et 2,4 mm/an,
- 21 % dépasse 2,4 mm/an,

³² Kleypas J.A., Buddemeier R.W., Archer D., Gattuso J.P., Langdon C., Opdyke B., 1999, *Geochemical consequences of increased atmospheric CO₂ on coral reefs*, Science, 284, 118-120.

- 1 % le niveau est resté stable,
- 27,5 % le niveau a baissé.

D'après C. Morhange *et al.*, (1993), toutes les stations marégraphiques méditerranéennes indiquent un ralentissement constant des vitesses globales de montée relative du niveau marin.

5.1.1. Les données concernant les Tuvalu

Suivant les auteurs, les livres, les articles, les données concernant l'évolution négative ou positive du niveau de la mer évoluent. Depuis les premiers modèles établis en 1993 qui considéraient que le niveau de la mer montait de 2 mm/an aux Tuvalu, les résultats des observations récentes sont plus variés et même disparates.

D'après R.F. McLean (1989 *in* Aalbersberg B. et Hay. J., 1991), les données collectées sur six marégraphes du Pacifique central et sud-ouest ne montrent aucun changement significatif du niveau marin aux Tuvalu depuis 1910.

Selon T. Price (2003), les enregistrements régionaux effectués sur le long terme dégagent une élévation comprise entre 10 et 17 mm par décennie, et cela depuis le début du XX^e siècle. Ainsi, l'archipel aurait subi une élévation de 10 cm, pour la valeur minimale, ou de 17 cm, pour la valeur maximale, en un siècle, sans avoir observé de modification notoire dans son système littoral !

Pour certains (Fickling D., 2003), le niveau de la mer s'est élevé dans l'archipel suivant trois phases, qu'ils ne précisent pas, à la même vitesse que le niveau mondial (?) et serait désormais 5 cm plus haut qu'en 1993 alors que pour d'autres (Hunter J., 2004 *in* Allen L., 2004), le niveau de la mer est monté de 5 mm/an depuis dix ans.

Depuis 1993, le niveau de la mer dans l'atoll de Funafuti aurait augmenté de 7 mm/an, d'après la personne en charge de collecter les données marégraphiques, de 2 mm/an d'après l'IPCC³³ et de 4 mm/an d'après la responsable du service météorologique de Fongafale.

Si l'on envisage des périodes d'observations différentes, nous pouvons avoir des données oscillant entre celles que nous venons de voir précédemment et - 86,9 mm pour une observation de 6,8 années (Mitchell W. *et al.*, 2000), + 0,92 mm/an pour 21,6 années de mesures (University of Hawaiï *in* National Tidal Facility, 2002, 2003), alors que d'autres observateurs estiment que « *the historical record shows no visual evidence of any acceleration in sea level trends* » (NTF *in* Field M., 2002).

Tableau 6 : Interprétation eustatique dans l'océan Pacifique d'après Mitchell W. *et al.*, (2000)

Localisation	Nombre d'années d'observation	Changement du niveau de la mer (en cm)
Fidji	7,3	+ 1,01

³³ Reportage télévisé – *Le naufrage des Tuvalu* par Marianne Aschenbrenner et Bernd Niebrügge (France 5)

Vanuatu	6,2	+0,92
Tonga	7	+13,34
Cook	6,9	+4,83
Samoa	6,9	-3,22
Kiribati (Gilbert)	6,8	-11,74
Marshall	6,3	+1,98
Tuvalu	6,8	-8,69
Nauru	6,5	-10,82
Salomon	5,3	+2,87
Papouasie Nlle Guinée	4,2	+5,96

Ces modifications constantes des valeurs des variations eustatiques ne sont donc pas un fait exclusivement tuvaluan, mais se retrouvent à l'échelle du Pacifique. Ainsi, en 1999, il était question d'une baisse du niveau relatif de la mer dans l'archipel des Kiribati de 21 mm, alors qu'aux Marshall, il avait été observé une élévation de + de 2,9 mm (Field M., 1999).

5.1.2. Les données concernant les Maldives

D'après le ministère de l'Environnement (2001)³⁴, le niveau relatif de la mer aurait augmenté de 1 mm en dix ans, bien qu'aucune explication n'ait été apportée à cette valeur. Pour T.M.A. Khan *et al.* (2002), le niveau moyen de la mer augmente de façon importante dans l'archipel. Les auteurs donnent des valeurs d'élévation comprises entre 4,1 mm/an pour la partie centrale de l'archipel et 3,9 mm/an pour l'archipel méridional, et cela depuis 1991. Pour d'autres, l'augmentation des températures des eaux de l'océan Indien, qui est de 0,12 °C par décennie depuis les cinquante dernières années (Rajasuriya A. *et al.*, 2000), joue un rôle indéniable dans les modifications eustatiques de cet océan, sans aller plus avant dans la démonstration.

D'après M. Merrifield (SOEST-Hawaï)³⁵ « *the high sea level rises rates observed at the Maldives are not reflected in satellite measurements of the surrounding ocean, which again points to land subsidence as a potential probleme* ». Pour d'autres (U.N.D.P., 2000), il n'y a aucune évidence d'une remontée du niveau de la mer dans l'archipel : « *... microatoll evidence that indicates that there has not been a significant rise in water level over the last 30 years in the Maldives* ».

Pour d'autres encore (Mörner N-A. *et al.*, 2003 ; Mörner N-A. *et al.*, 2004), le niveau de la mer tend à baisser depuis 1970, entre 20 et 30 cm, lié à une augmentation de l'évaporation, à la gravité anormalement basse et aux différents mouvements affectant l'archipel comme les courants, les

³⁴ Entretien avec M. Mohamed Khaleel

³⁵ Discussion par échange de courrier électronique

phénomènes mondiaux comme El Niño. De fait, entre 1993-1996, la tendance est à la stabilité (avec un bruit de ± 5 mm) ; entre 1997-1998, on assiste à une élévation puis à une baisse du niveau de la mer due au phénomène El Niño, et, enfin, entre 1998 et 2000, seule une élévation inférieure à 5 mm semble s'observer.

Ces observations vont sensiblement dans le même sens que l'opinion déjà exprimée en 1990 par C.D. Woodroffe et R. Mclean : « *the majority of microatolls sampled on these atolls³⁶ record a slight fall in sea level over the past ten years* ». Sur les 30 échantillons prélevés sur le terrain, la majorité montre une baisse récente du niveau de la mer. Les microatolls actuels, présents sur les platiers, indiquent de par leur taille qu'il n'y a pas eu d'élévation importante et notable du niveau marin durant les dernières décennies, mais suggèrent une légère baisse, plus prononcée aux Kiribati et aux Cocos où la croissance des microatolls est limitée aux bas niveaux.

Au-delà des données *stricto sensu*, il existe également des observations subjectives émanant de questionnaire sur les variations passées du niveau moyen de la mer. Au travers de ce questionnaire, nous souhaitons faire une appréciation qualitative en interrogeant des personnes originaires de l'atoll de Funafuti nées au début du siècle dernier afin d'avoir un recul historique suffisant. Bien que peu nombreuses (11), plusieurs réponses ont été récurrentes comme celles concernant les « patates » coralliennes localisées dans le lagon. Les personnes interrogées avaient pu observer que, depuis leur enfance, certains coraux étaient affleurants alors qu'auparavant ils étaient immergés. Doit-on voir en cela une légère régression du niveau lagonaire ou une influence isostatique ? Des remarques similaires ont été également formulées par la population locale à certains membres de l'*INQUA* (Mörner N-A. *et al.*, 2004) lors d'une mission effectuée dans l'atoll de Felidhoo. En effet, les pêcheurs locaux leur ont rapporté qu'auparavant, dans les années 1970 et au début des années 1980, ils n'avaient aucun problème pour naviguer au-dessus du thila de Maduvvari Falhu pour rejoindre l'océan lors de leur campagne de pêche. Or, ils ont remarqué que depuis une quinzaine d'années, ils sont obligés de le contourner afin de ne pas toucher la partie sommitale du récif. D'après nos observations, les thilas ne sont pas en position de croissance, ce qui laisse supposer que soit le niveau relatif de la mer baisse dans l'archipel central des Maldives, soit que la ride volcanique subit un exhaussement.

L'observation de tant de valeurs différentes nous montre donc qu'il faut les utiliser avec une grande prudence car nous considérons, comme l'estiment certains chercheurs, qu'il est prématuré de vouloir dégager du profil des courbes une tendance générale en l'absence de séries suffisamment longues et d'un niveau repère global stable (Pirazzoli P.A., 1996 ; Vanney J-R., 2002).

³⁶ Maldives, Cocos, Kiribati

5.2. Les enseignements issus des variations du niveau moyen de la mer

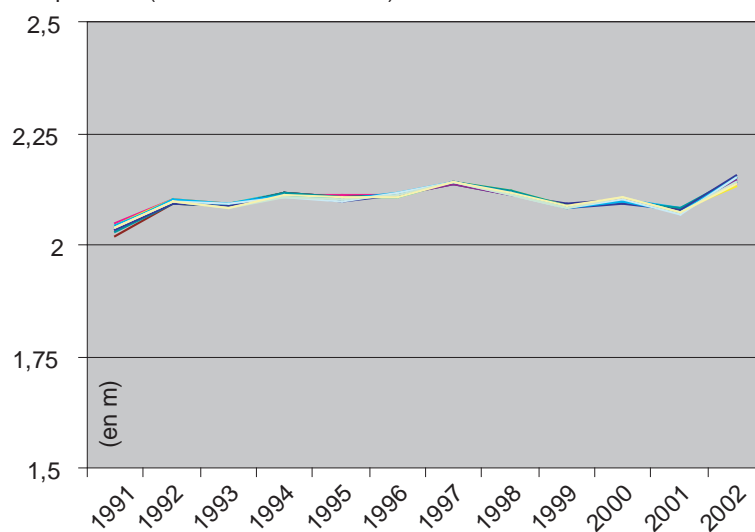
Les marégraphes donnent en fonction du temps la hauteur instantanée du niveau de la mer en un lieu donné, au-dessus d'un plan de référence appelé « niveau moyen de la mer » qui correspond à la moyenne de toutes les hauteurs d'eau enregistrées par les marégraphes dont on a soustrait les mouvements périodiques et aléatoires.

Bien que très inégalement répartis à la surface du globe, nous avons eu la chance de disposer pour ce mémoire des données de deux marégraphes dans l'archipel des Tuvalu et de trois dans l'archipel des Maldives localisés respectivement dans les îles de Fongafale (atoll de Funafuti), Gan (atoll d'Addu), Hulhulé (atoll de Kaafu) et Hanimadhoo (atoll de Haa Dhaal). Les enregistrements des stations marégraphiques concernent les périodes 1977-1999, 1993-2003, 1993-2004 pour l'archipel tuvaluan et 1987-2001, 1989-2001 et 1991-2002 pour les îles de Gan, Hulhulé et Hanimadhoo dans l'archipel maldivien. Nous disposons également des données enregistrées entre 1988 et 1989 par le premier appareil de mesure initialement localisé dans l'île de Malé. Ce dernier a été déplacé sur l'île voisine d'Hulhulé car les remblais sur lequel il avait pris appui généraient une subsidence anthropique trop aléatoire pour envisager des corrections.

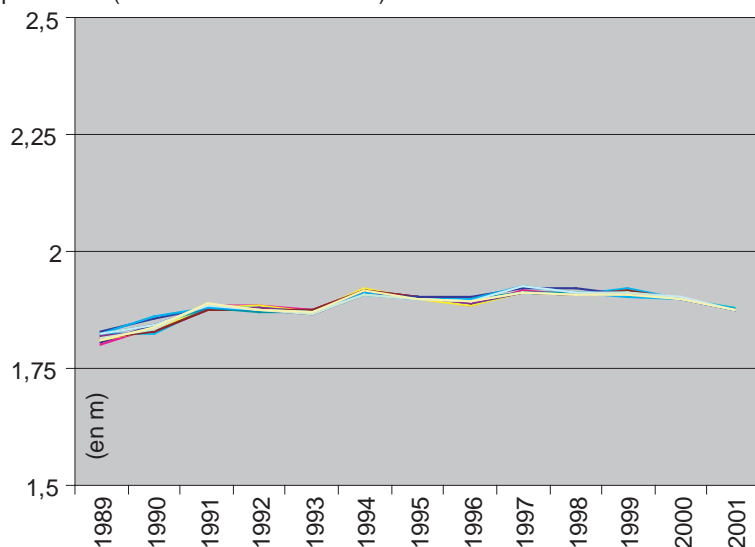
Les données indiquées ci-dessous doivent être interprétées avec prudence, notamment lorsqu'elles sont inférieures à 50 ans, car elles peuvent mettre en évidence des fluctuations eustatiques liées à des oscillations climatiques ponctuelles qui seront perçues différemment sur les tendances à long terme (Pirazzoli P.A., 1986). Cette remarque est confirmée par la lecture des courbes de données pour l'archipel maldivien où toutes les micro-variations ressortent de façon exagérée (cf. Figures 100, 101). Des imprécisions tiennent également au fonctionnement et à l'emplacement des stations marégraphiques. Si nous n'avons malheureusement pas pu observer les stations maldiviennes pour des raisons d'éloignement ou d'autorisation, celles de l'île de Fongafale retiennent toute notre attention. La station de mesure localisée initialement sur le quai de Vaiaku qui a enregistré les données de 1977 à 1999 a été remplacée dès 1993 par celle située sur le « main wharf », dans le nord de l'île de Fongafale. Ce changement s'est opéré après l'affaissement constaté du quai construit depuis la Seconde Guerre mondiale. Le nouvel emplacement sur le quai de déchargement des bateaux de commerce peut être surprenant lorsque l'on constate son instabilité. Alors que nous avons installé notre station de mesure sur ce quai, afin d'effectuer le levé des côtes dans ce secteur de l'île, nous avons été surprise par son tremblement à chaque mouvement d'un bateau arrimé à celui-ci. Dans l'île, ce quai de mauvaise réputation a été construit à la hâte, ce qui ne lui assure pas une grande stabilité. Il fait même l'objet de plaisanteries de la part de la population qui parie sur la date de son effondrement.

Figure 100 : Comparaison des courbes marégraphiques dans l'archipel des Maldives

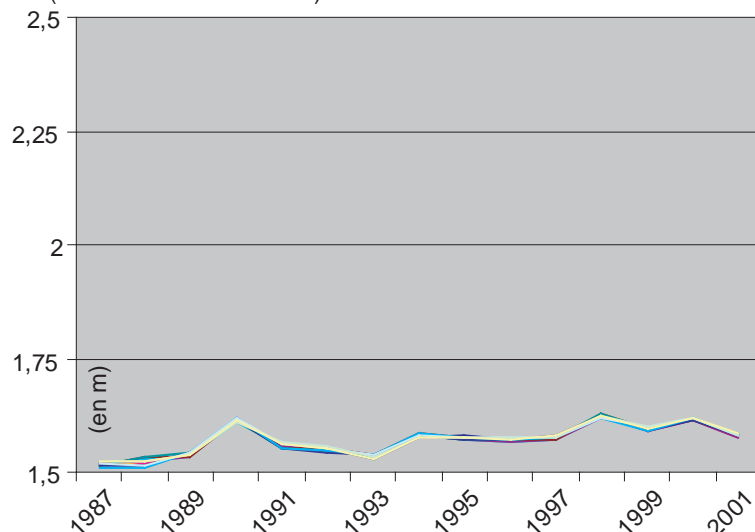
Hanimadhoo - Archipel nord (06°46'0"N - 73°10'0"E)



Hulhulé - Archipel centre (04°11'04"N - 73°31'06"E)



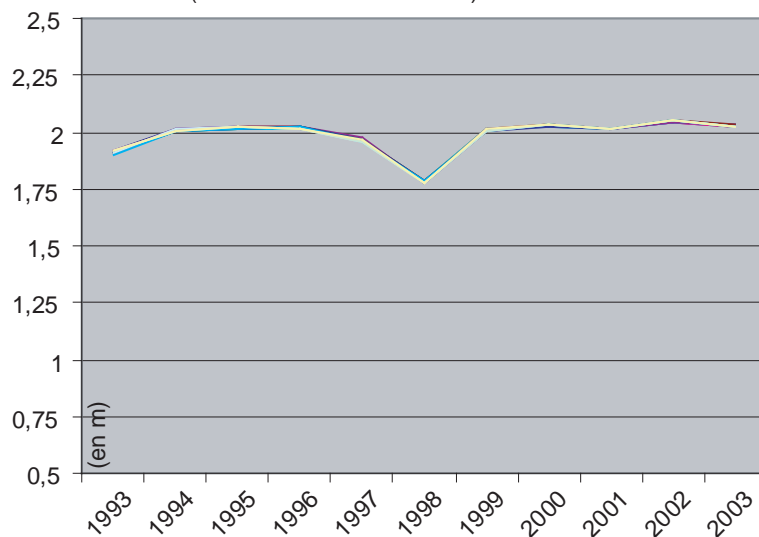
Gan - Archipel sud (00°41'02"S - 73°09'01"E)



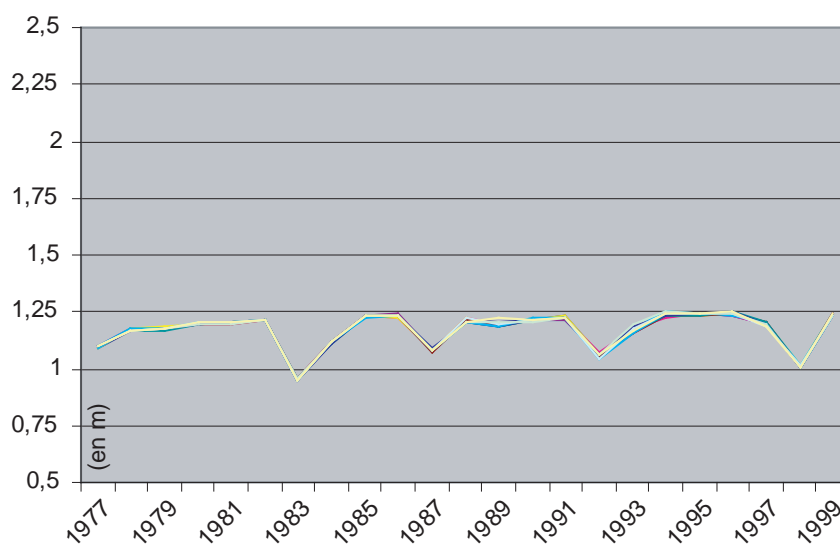
- Janvier
- Février
- Mars
- Avril
- Mai
- Juin
- Juillet
- Août
- Septembre
- Octobre
- Novembre
- Décembre

Figure 101 : Comparaison des données marégraphiques dans l'île de Fongafale, Tuvalu

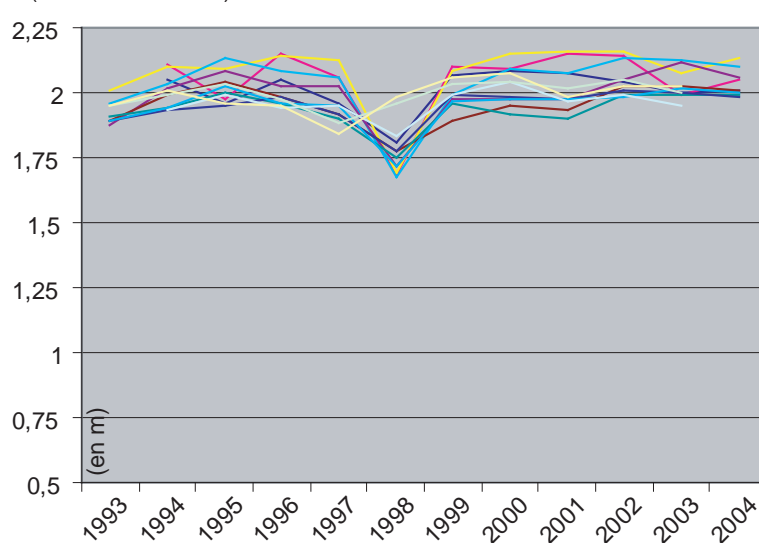
Hawaï - SOEST - Funafuti B (08°30'02"S - 179°12'06"E)



Hawaï - SOEST - Funafuti A (08°31'05"S - 179°11'07"E)



Funafuti-NTF (8°32'S - 179°13'E)



- Janvier
- Février
- Mars
- Avril
- Mai
- Juin
- Juillet
- Août
- Septembre
- Octobre
- Novembre
- Décembre

Interprétation des données sur la période historique récente

Les données utilisées dans la détermination de l'évolution du niveau moyen de la mer sont issues des enregistrements marégraphiques journaliers fournis par le *National Tidal Facility*, localisé en Australie, et le UH Sea Level Center d'Hawaï. Celles-ci ont été traitées sous la forme de moyennes mensuelles puis de moyennes annuelles afin de faciliter les interprétations et les comparaisons.

Les courbes moyennes annuelles (cf. Figure 102) à l'échelle de l'archipel maldivien mettent en évidence une différence latitudinale dans la distribution du niveau moyen de la mer enregistrée dans les ports des îles de Gan, d'Hulhulé et d'Hanimadhoo. Si la moyenne des mesures enregistrées sur Gan montre un niveau moyen de 1,5 m + 0,1 m, à Hulhulé puis à Hanimadhoo, il avoisine respectivement les 1,8 m + 0,1 m et 2 m + 0,2 m.

Aux Tuvalu, nous observons une différence notable dans la moyenne annuelle du niveau moyen de la mer puisqu'entre les valeurs communes d'observations des deux marégraphes il y a une différence d'environ 80 cm. Ainsi, la série la plus ancienne (1977-1999) situe le niveau moyen de la mer aux alentours de 1,2 m alors que pour les deux autres enregistrements, on le retrouve vers 2 m. Nous pouvons alors nous interroger sur la fiabilité de ces mesures sans pour autant être capable de considérer laquelle des deux se rapproche le plus de la réalité. Comme elles sont les seules données disponibles et utilisées par tous pour analyser l'évolution passée et estimer l'évolution future, nous ne pouvons pas ne pas les analyser.

Nous avons souhaité effectuer une analyse plus fine des enregistrements, en considérant la différence entre la première puis la dernière valeur de chaque série annuelle ainsi que la différence de toutes les valeurs annuelles pour une même série.

Nous obtenons alors pour les marégraphes des deux archipels :

- Gan : une différence de 0,0633 m entre 1987 et 2001 et une variation annuelle sur l'ensemble des éléments de la série statistique de **0,026 m**,

- Hulhulé : une différence de 0,059 m entre 1989 et 2001 et une variation annuelle sur l'ensemble des éléments de la série statistique de **0,0153 m**,

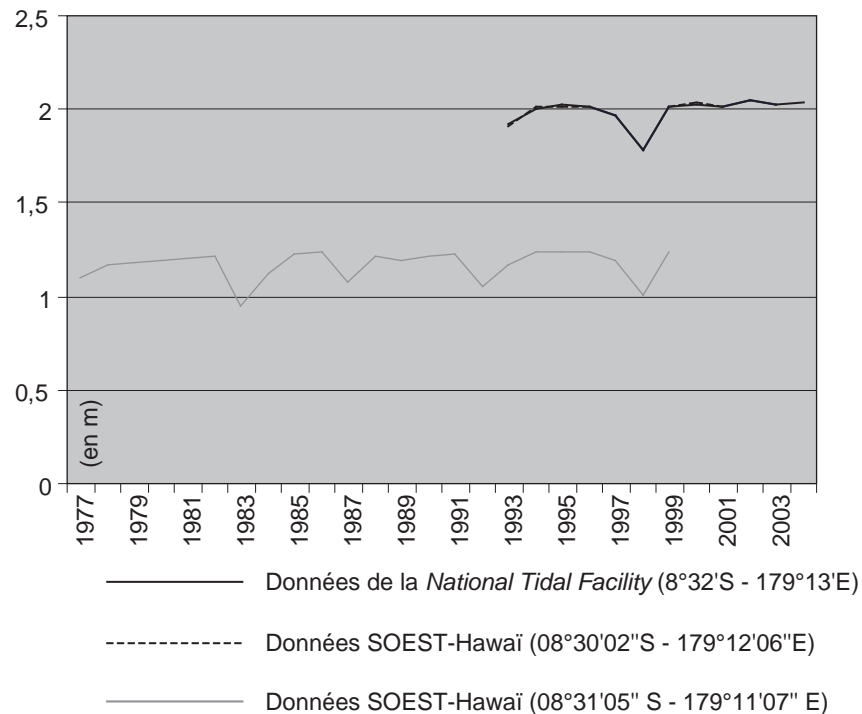
- Hanimadhoo : une différence de 0,1063 m entre 1991 et 2002 avec une variation annuelle sur l'ensemble des éléments la série statistique de **0,02718 m**,

- Fongafale (NTF) : une différence de 0,1121 m entre 1993 et 2004 avec une variation annuelle sur l'ensemble des éléments de la série statistique de **0,0611 m**,

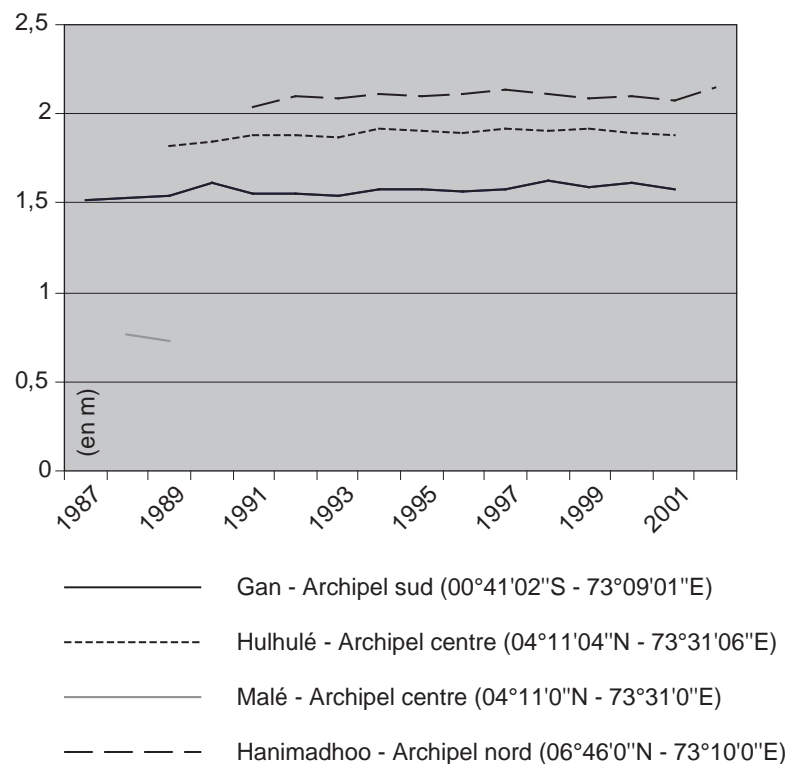
- Funafuti B : une différence de 0,1141 m entre 1993 et 2004 avec une variation annuelle sur l'ensemble des éléments de la série statistique de **0,0067 m**,

Figure 102 : Variation du niveau marin relatif dans les archipels tuvaluan et maldivien

Marégraphes de Fongafale



Marégraphes localisés dans l'archipel maldivien



- Funafuti A : une différence de 0,1405 m entre 1977 et 2004 avec une variation annuelle sur l'ensemble des éléments de la série statistique de **0,0826 m**.

Ainsi, pour toutes les séries, il y a une élévation observable pour l'ensemble des enregistrements analysés comprise entre 8 cm et 6 mm/an pour l'archipel tuvaluan et entre 2 et 1 cm/an pour l'archipel des Maldives.

La variabilité temporelle du niveau relatif de la mer, mise en évidence dans ces séries, ne peut toutefois être évaluée avec exactitude à partir des quelques données dont nous disposons, compte tenu de l'importance des tendances négatives dans les différentes séries et des variations de données au sein d'un même lagon d'atoll.

La variation du niveau moyen considéré dans la plus longue série dont nous disposons montre des oscillations nombreuses ne reflétant pas une élévation notable.

Il ressort toutefois des informations intéressantes concernant des événements extérieurs influençant le niveau moyen de la mer comme, par exemple, les phénomènes océaniques mondiaux de type El Niño (cf. Figures 103, 104). Ainsi, sur la lecture de la distribution annuelle dans l'archipel des Tuvalu, les courbes de 1983 et de 1998, années El Niño sont très nettement inférieures à la tendance générale des autres années.

Ainsi, les fluctuations du niveau marin peuvent être de trois ordres (Solomon S.M. et Forbes D.L., 1999) en étant liées : soit à un phénomène ponctuel comme une tempête, un cyclone, un changement dans le régime des vents..., soit à un phénomène saisonnier ou annuel comme El Niño, soit à un phénomène décennal, séculaire ou pluri-séculaire comme les variations eustatiques, climatiques et tectoniques.

La dispersion des résultats à l'échelle locale, puis à l'échelle des deux océans, de même que l'imprécision des marégraphes ne permettent pas de dégager une tendance eustatique objective, ni à la hausse, ni à la baisse.

C'est d'ailleurs dans cette perspective que nous attendons beaucoup des observations géodésiques spatiales réalisées à partir de satellites à altimètre embarqué comme le satellite Topex-Poséidon (1992), ou plus récemment Jason-1 (2001) et Jason-2 (prévu pour 2004), qui fournissent des mesures avec une précision inférieure à 2 cm. Ces observations altimétriques satellitaires sont très certainement les données les plus fiables pour observer le comportement de l'océan Mondial même si, au même titre que les données marégraphiques, elles n'ont pas un recul nécessaire. Les derniers résultats fournis par le CNES³⁷ montrent une élévation moyenne des océans de 1,4 mm/an (Simon B., 2000) ou de 2 mm/an (Cazenave A., 1999) qui « peut être toutefois empreinte d'une grande variabilité spatiale de la

³⁷ Centre National d'Etudes Spatiales

Figure 103 : Comparaison de données marégraphiques dans l'île de Fongafale, Tuvalu

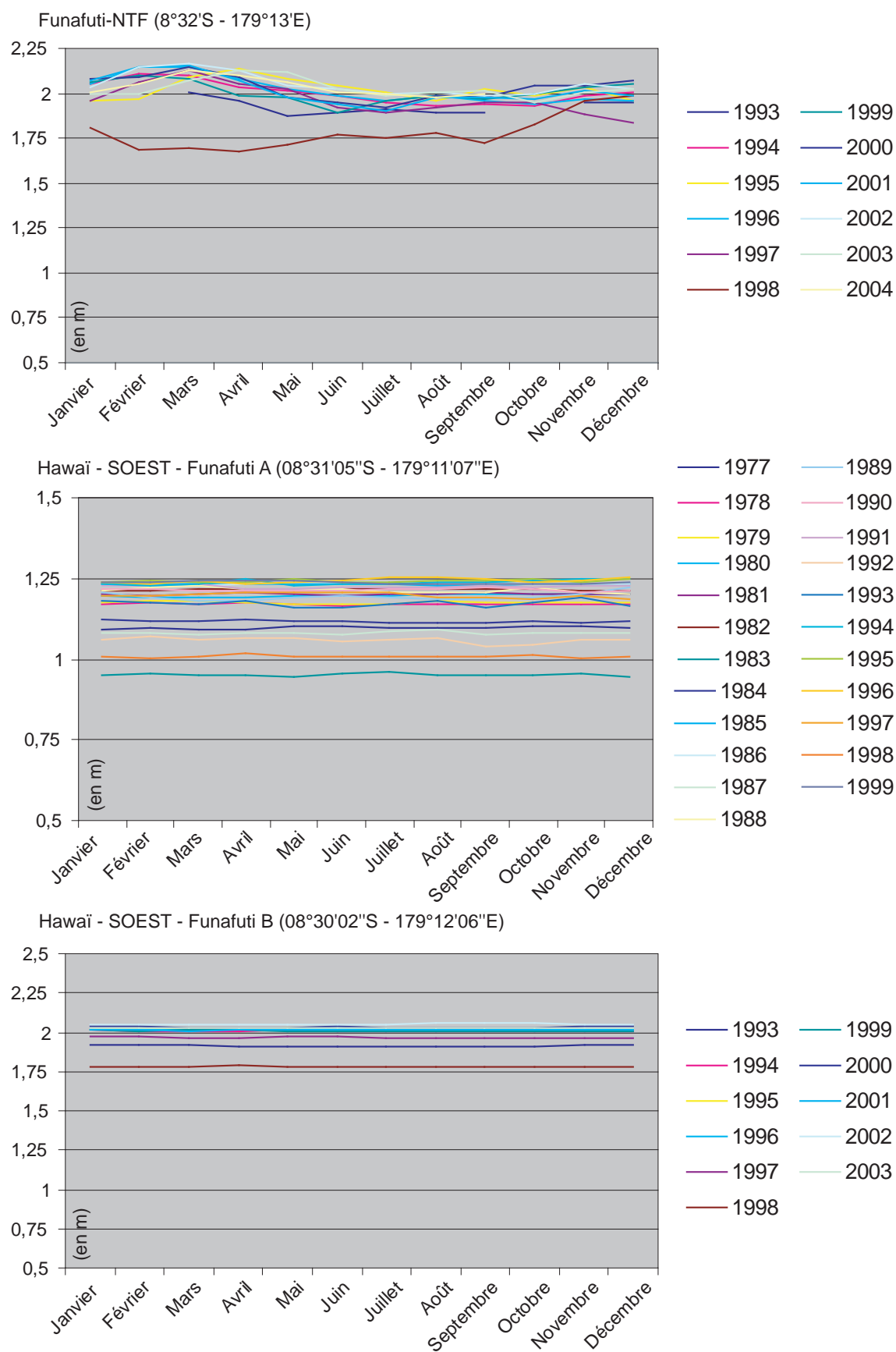
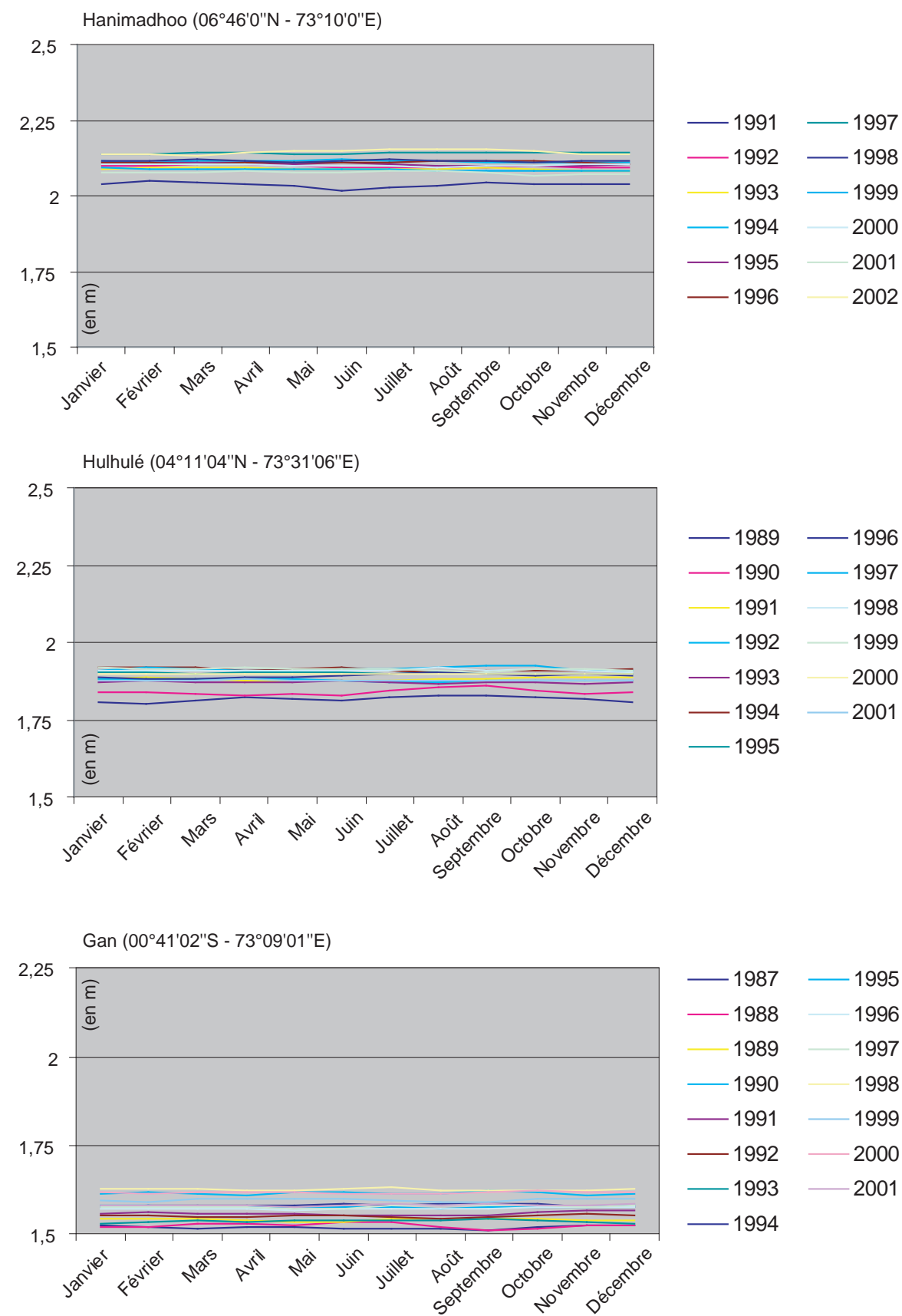


Figure 104 : Données marégraphiques latitudinales à l'échelle de l'archipel des Maldives



tendance, puisque, par exemple dans le Pacifique équatorial, elle est très nettement négative, et d'une grande variabilité temporelle puisque le cumul des données observées n'est que de douze ans ».

La plupart des auteurs admettent pour le siècle écoulé, une tendance à la hausse de l'ordre de 1,5 à 1,9 mm/an, ce qui est assez proche des mesures altimétriques. Toutefois, d'après A. Cazenave (1999), cette concordance est fortuite, eu égard aux moyens, aux sites et aux durées d'acquisition des données. Il s'agit toutefois d'un taux important si on le compare au rythme de la remontée holocène qui a été estimé en moyenne, pour tous les océans, entre 1 et 1,5 mm/an (Vanney J-R., 2002).

Il faudra donc attendre avant de savoir si l'évolution du niveau moyen correspond à une tendance positive sur le long terme ou à une fluctuation envisagée à court ou moyen terme. Faut-il alors rechercher les évolutions morphologiques des accumulations sédimentaires à l'échelle d'un archipel dans les modifications des conditions climatiques ?

5.3. Evolution des conditions climatiques sur la période historique récente

Au même titre que les variations eustatiques, les conditions climatiques évoluent également. Ainsi, pour l'IPCC (*in* Houghton *et al.*, 1990), la température moyenne globale a augmenté de 0,3 à 0,6 °C depuis un siècle, même si, à l'échelle du Pacifique, certaines données montrent une température actuelle inférieure de 0,2 °C par rapport à 1940. Pour le NIWA³⁸, des changements climatiques concernant les Etats du pacifique, sont très nettement observables depuis le milieu des années 1970. Ainsi, des mesures effectuées à partir de 34 stations météorologiques, montrent que la température de l'air avait augmenté de 0,3 à 0,8 °C depuis un siècle d'observations.

Dans le cours de ce chapitre, nous donnerons les caractéristiques climatiques générales à partir de l'interprétation des données. Nous déterminerons des tendances, nous évoquerons des modifications à l'échelle de nos terrains d'étude mais loin de nous l'idée de dégager des modèles climatiques. Ces analyses peuvent nous servir pour comprendre la distribution des îles, la réalimentation des lentilles d'eau douce, l'érosion des côtes mais il ne s'agit aucunement de traiter cela du point de vue d'un climatologue, dont nous n'avons pas les compétences.

L'analyse des entretiens que nous avons faits avec les personnes âgées de Fongafale a également dégagé des tendances. Ainsi, pour eux, il existe désormais une distinction très nette entre la saison sèche et la saison humide, ce qui n'existait pas durant leur jeunesse. Pour d'autres, l'atoll de Funafuti ne reçoit plus aucun flux d'ouest. Une réponse unanime a été dégagée concernant les variations de

³⁸ *New Zealand Institute of Water and Atmospheric Research*

températures de l'air qui aurait largement augmenté depuis leur jeunesse. S'agit-il là d'une évolution avérée du climat ou d'une mauvaise perception des changements entre avant et aujourd'hui ?

Nous tenterons de répondre à cette question désormais récurrente : y'a-t-il à l'échelle de nos archipels une augmentation significative des températures induisant des changements climatiques ?

5.3.1. Les paramètres anémométriques

Les données utilisées dans ce mémoire, issues des mesures collectées par les stations météorologiques de Fongafale et d'Hulhulé, correspondent à des moyennes mensuelles et annuelles calculées à partir des périodes 1982 et 2002 et 1967 et 2002. Ces stations situées sur nos terrains d'étude, à une même altitude, ont l'avantage de donner des informations précises sur les agents influençant la morphologie littorale. Ce travail réalisé à partir des données de vent en direction et en intensité a pour objectif, dans une perspective de modification climatique, d'observer les éventuelles variations au sein des séries, d'estimer si la recrudescence des événements tempétueux concerne également nos terrains d'étude.

Le système intertropical n'est pas homogène mais est constitué d'un grand nombre de sous-systèmes dont les fonctionnements sont géographiquement spécifiques. L'alizé et la mousson sont les types de flux tropicaux présents sur nos archipels dont le premier agit sur l'archipel tuvaluan et le second sur les Maldives. Leur distinction fondamentale est liée à leur trajectoire : l'alizé maritime, de direction dominante est, ne franchit pas l'équateur géographique alors que la mousson le traverse.

5.3.1.1. Les caractéristiques des vents aux Tuvalu

Les mesures utilisées dans les tableaux ci-dessous sont exprimées en degré pour la direction des vents et en nœuds pour leur intensité. La distribution annuelle des vents entre les périodes 1982-1992 (11 ans) et 1993-2001 (9 ans) fait ressortir deux grands secteurs situés entre 10 et 150° puis entre 250 et 360°, dont nous affinerons l'interprétation.

De 1982 à 1992, nous constatons que les vents qui se distribuent dans le grand quart est agissent surtout entre les mois de mai et décembre (cf. Figures 105, 106), alors que les vents du grand quart ouest concernent les mois de février à avril. Le mois de janvier que l'on peut qualifier de transitoire peut varier entre ces deux secteurs. Les vents de secteur est, compris entre 30 et 50 Nds sont moins violents que les vents de secteur ouest qui ont une distribution plus éclatée allant de 30 Nds à plus de 60 Nds.

Entre 1993 et 2001, on observe un regroupement et une baisse de l'intensité des vents, plus particulièrement pour les vents d'ouest. Les vents de secteur est, compris entre les mois de mai à novembre se distribuent entre 27,5° et 150° suivant une intensité de 26 Nds à 45 Nds. Les vents de

Figure 105 : Distribution des vents, par intensité et direction, dans l'archipel des Tuvalu entre 1982 et 2001

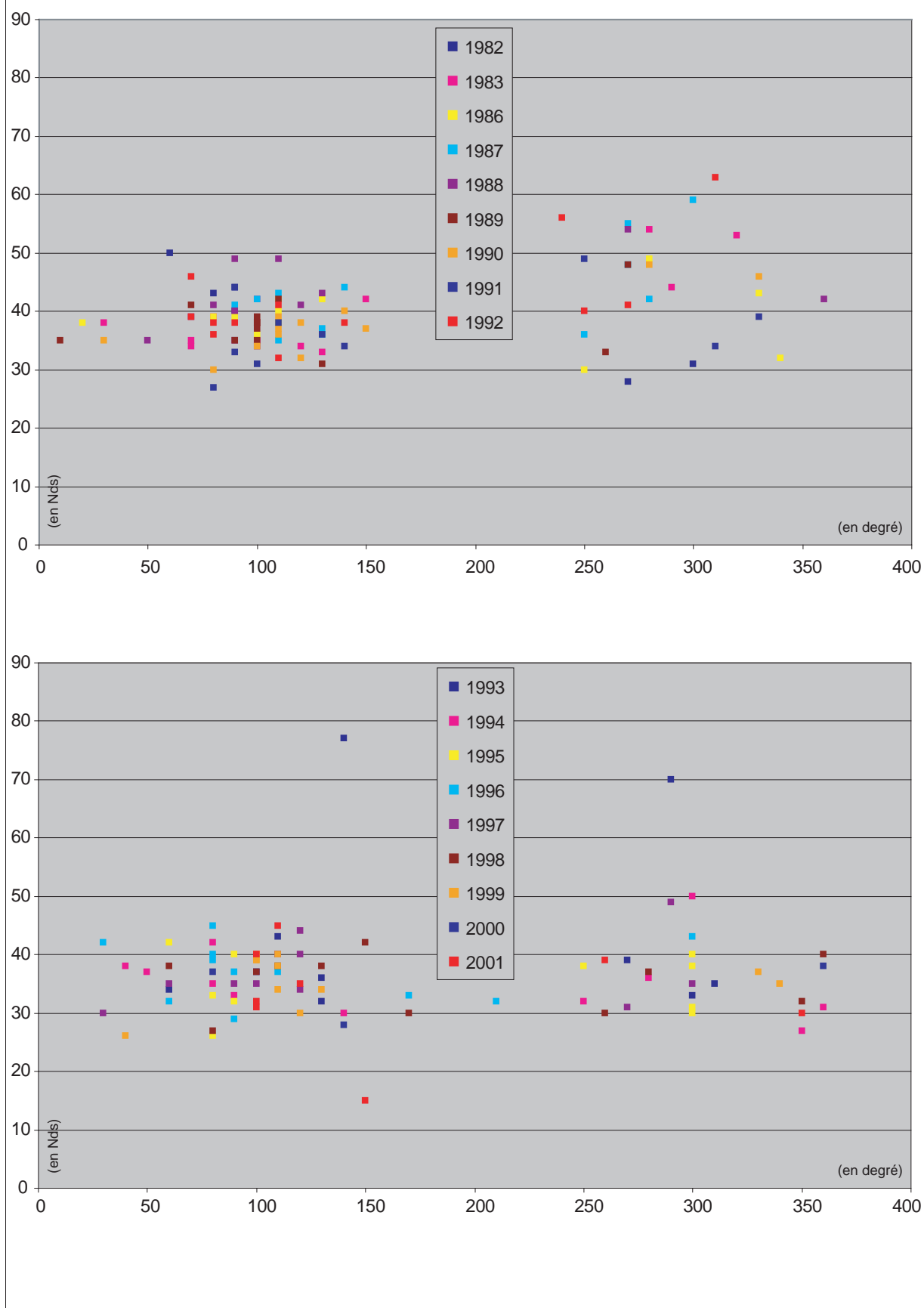
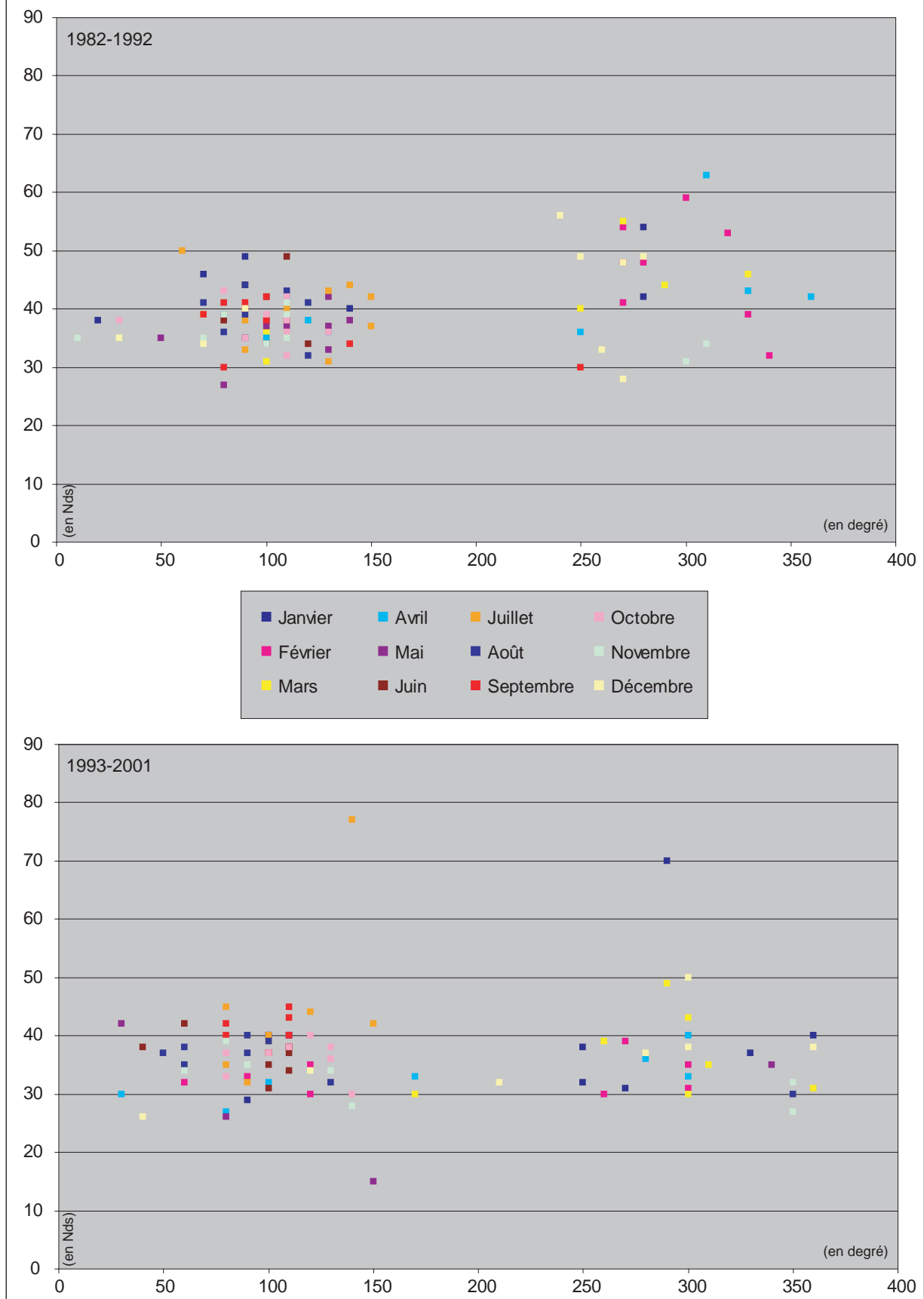


Figure 106 : Distribution mensuelle des intensités et des directions de vents dans l'archipel des Tuvalu



secteur ouest, distribués de janvier à avril, qui devient un mois transitoire, sont compris entre les directions 250 et 350° avec des intensités variant de 30 à 50 Nds.

La répartition dans les directions de vents, bien distribuée au cours de la première période, devient plus éclatée dans la seconde période avec une baisse moyenne de l'intensité et l'introduction de vents de secteurs sud.

Sur les 20 années d'observations, seule l'intensité des vents a varié et, contre toute attente, on observe une légère tendance à la baisse entre la période 1982-1992 et 1993-2001. Au cours de la première période, l'intensité des vents est rarement inférieure à 30 Nds, voire 35 Nds si l'on considère la figure 107 (annexe), mais peut dépasser de façon récurrente les 50 Nds, notamment pour les flux d'ouest. Ces derniers tendent d'ailleurs à s'étendre sur l'année. Au cours de la seconde période, l'intensité évolue entre 26 et 45 Nds et ne dépasse que très rarement les 50 Nds. Seuls deux événements majeurs en 1993 ont atteint les 70 et 77 Nds. Nous n'observons pas de changement notable concernant des modifications dans la direction des vents puisqu'ils restent majoritairement concentrés entre les directions 27,5° et 150° puis 250°-360° pour le reste de l'année.

Cette tendance à la baisse se retrouve dans le tableau élaboré à partir des moyennes bi-décennales qui donne une interprétation légèrement différente des valeurs mensuelles puis annuelles par l'introduction de flux de secteur sud et une distribution étalée entre les directions 90° et 250°.

L'observation des moyennes annuelles ne permet pas de dégager un secteur de vent prioritaire pour des années spécifiques.

Les flux d'alizés présents aux Tuvalu montrent une grande régularité dans leurs directions, avec toutefois une légère baisse dans leurs intensités.

5.3.1.2. Les caractéristiques des vents aux Maldives

Les données que nous avons examinées concernent la période 1967 à 2002, soit 36 ans d'observations. Nous avons analysé les distributions mensuelle et annuelle des vents par période de 12 ans suivant leur direction exprimée en degré et leur intensité exprimée en nœuds.

L'évolution des secteurs de vents entre les trois périodes fait ressortir un secteur situé entre 45° et 90° et un autre situé entre 225° et 360°. Il s'agit donc de deux saisons climatiques qui jouent sur l'alternance des vents (cf. Figures 108, 109 – annexe) (Figures 110, 111).

Entre 1967 et 1978, les vents de secteur est se distribuent suivant deux orientations principales à savoir NE et ENE entre les mois de décembre et mars suivant une intensité oscillant entre 3 et 14Nds, pour une moyenne située aux alentours de 10 Nds. La seconde période de l'année, comprise entre avril et fin octobre, voire début novembre, ce dernier constituant un mois transitoire, montre quatre

Figure 110 : Distribution des vents, par intensité et direction, dans l'archipel des Maldives entre 1991 et 2002

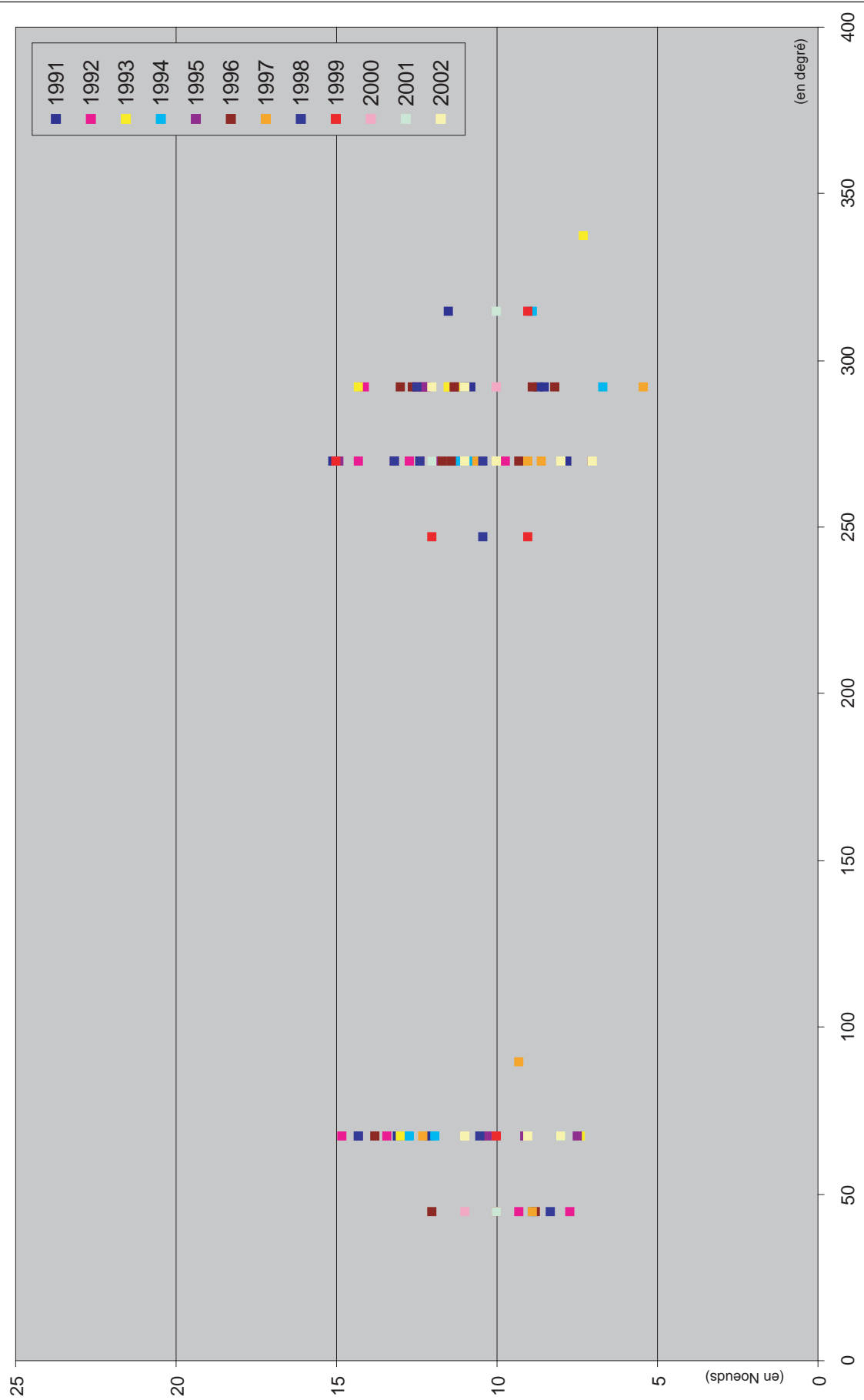
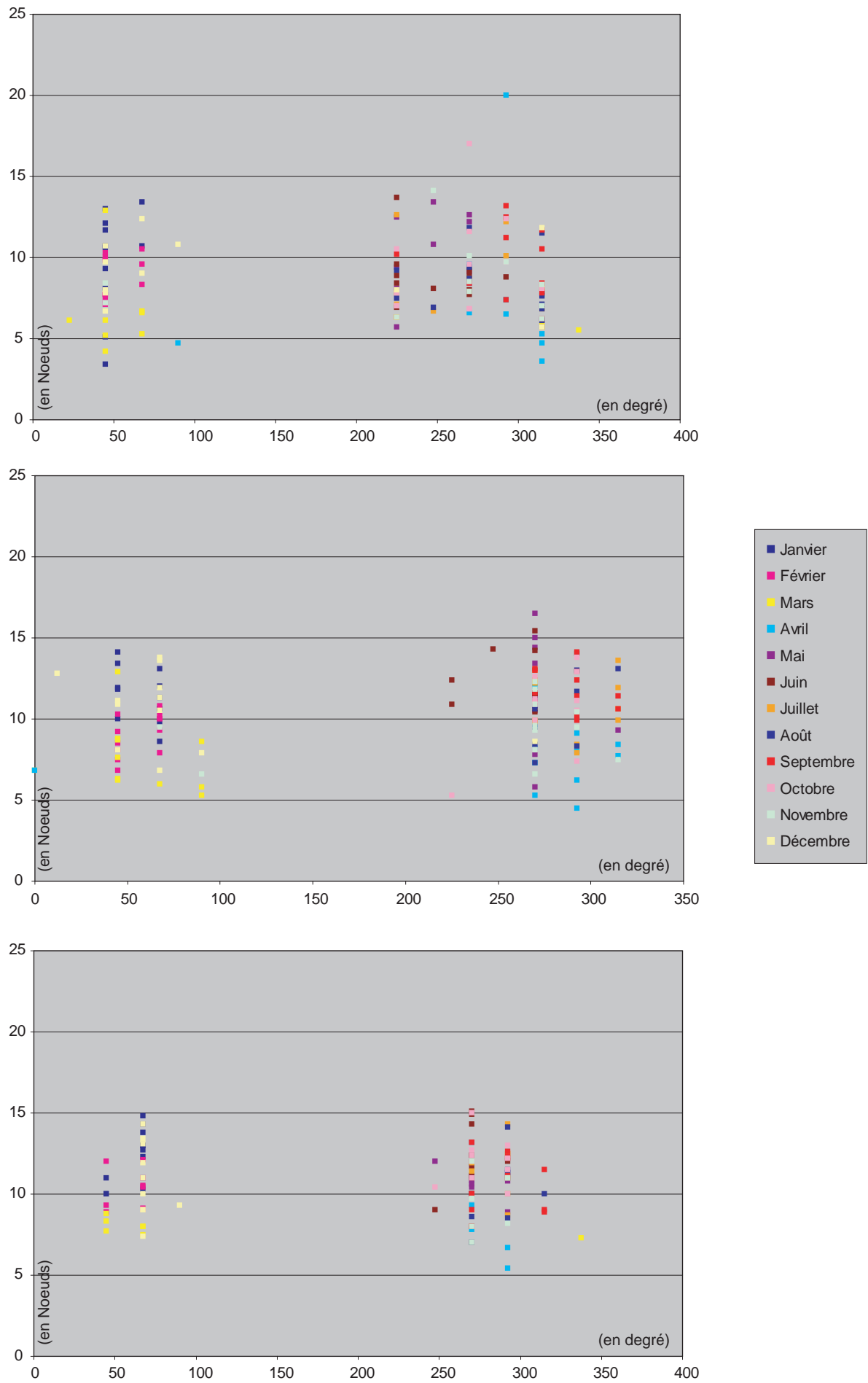


Figure 111 : Distribution mensuelle des vents et de leur intensité dans l'archipel des Maldives de 1967 à 2002



tendances principales (SW, W, WNW, NW) et une secondaire (WSW). L'intensité des vents est comprise entre 3 et 14 Nds, seul un événement de 20 Nds en avril 1975 marque la différence.

Entre 1979 et 1990, les deux organisations annuelles se retrouvent avec une distribution entre les secteurs NE et ENE pour les mois de décembre à mars et entre les secteurs W, WNW et NW pour les mois d'avril à octobre-novembre. L'intensité des vents augmente légèrement puisque, pour les deux saisons climatiques annuelles, les valeurs oscillent entre 4 et 17 Nds.

Entre 1991 et 2002, les tendances se retrouvent puisque, des mois de décembre à mars, les vents se localisent suivant deux directions NE et ENE, alors que, durant les mois d'avril à novembre, deux grandes tendances sont mises en avant, W et WNW. Les intensités tendent à augmenter, notamment pour les vents de secteurs est, puisqu'ils se distribuent entre 7 et 15 Nds, alors que les vents de secteur ouest gardent une intensité constante située entre 5 et 15 Nds.

Ainsi, pour les trois périodes, les distributions mensuelles ont légèrement changé, notamment durant les mois d'avril à novembre où la distribution s'est organisée selon deux orientations préférentielles. L'intensité des vents a également évolué positivement pour les deux moussons, passant de 3 Nds à 7 Nds pour les minimales et de 14 à 17 Nds pour les maximales.

Pour les moyennes annuelles, la période de 1979 à 1990 montre des vents préférentiellement de secteur est entre les années 1981-1983 puis 1987 qui ne se retrouvent pas dans les autres séries où la distribution annuelle est uniforme entre les deux saisons. Toutefois, l'augmentation dans l'intensité des vents ne correspond pas forcément aux dernières années puisque, dans la période 1991 - 2002, ce sont les années du début de la série qui étaient les plus venteuses alors que les années de la décennie 2000 se situent aux alentours de 10 Nds.

Ainsi, la distribution NE-SW admise par de nombreux auteurs comme étant les orientations des deux saisons de l'archipel maldivien n'est pas tout à fait représentative de la réalité des données. Si le secteur NE est objectivement représenté, il l'est à part égale avec le secteur ENE. Par contre, le secteur SW, présent durant la première période n'est plus représenté sur les dernières 24 années. Désormais, ce sont les secteurs W et WNW qui dominent. Ceci corrobore tout à fait les analyses morphométriques que nous avons réalisées sur l'archipel. Comme l'avait décrit Pyrard de Laval lors de son séjour dans l'archipel des Maldives de 1601 et 1611 (1998) : « les vents sont assez souvent fixes comme les courants du côté de l'est ou de l'ouest, mais ils varient bien davantage et ne sont pas si réglés... ».

En résumé, les graphiques des distributions périodiques traduisent une augmentation de l'intensité des vents dans l'archipel des Maldives pour les directions 50° et 250-300° alors qu'aux Tuvalu, on assiste à une baisse de l'intensité des vents sur la période 1993-2001 par rapport à la décennie 1982-1992.

Il nous faut toutefois être prudente quant à l'interprétation sur le long terme puisque les séries disponibles sont de courte durée et ne permettent pas de déterminer s'il s'agit d'une tendance sur le long terme ou d'une variation de courte ou de moyenne durée.

5.3.1.3. Les cyclones et les îles

Comme nous l'avons vu précédemment, l'action exceptionnelle des cyclones n'est pas obligatoirement dévastatrice pour les îles basses coralliennes, dans la mesure où elle n'est pas répétitive. C'est la récurrence du phénomène qui peut fragiliser les structures d'une île, étant donné les dommages que les houles cycloniques sont susceptibles de causer à l'ensemble frontorécifal. Par exemple, les plongées sous-marines qui ont été faites pour mesurer le degré d'impact du cyclone Bébé sur la barrière récifale de Fongafale ont mis en évidence un système d'éperons et de sillons bien développés, avec des sillons de 2 m de large sur 2 m de profondeur et des éperons de 2,5 m de largeur en moyenne. Cette caractéristique a été également notée par J.B. Lewis (2002) sur les récifs frangeants de La Barbade. En effet, les analyses qu'il a menées par photo-interprétation ont permis de montrer que les tempêtes et les cyclones peuvent jouer un rôle important dans l'accentuation des systèmes éperons-sillons ainsi que dans le creusement des brèches du front récifal et cela sur une période de temps extrêmement courte, ne dépassant pas un demi-siècle.

Dans de vastes lagons, comme celui de Funafuti, les vents peuvent générer lors de tempêtes des vagues destructrices de 2 à 3 m de haut caractérisées par une très courte période. D'après les réponses apportées par la responsable du service météorologique de Funafuti, Mme Hilia Vavae, les événements cycloniques sont en augmentation aux Tuvalu depuis le début du XX^e siècle, bien qu'elle admette que la pénurie d'archives pour le XIX^e siècle ne permette guère de justifier une telle assertion (cf. Figures 112 – annexe, 113).

Tableau 7 : Exemples de quelques événements cycloniques dans l'archipel des Tuvalu

1846	Nanumaga
2 février 1881	Nanumaga
23-24 décembre 1883	Nukulaelae – Funafuti
17-18 mars 1886	Nukulaelae
18 février 1891	Tuvalu (SW – SE)
1914	Tuvalu
1915	Nukulaelae
1928	Tuvalu
2 janvier 1958	Funafuti
21 octobre 1972 (cyclone Bébé)	Funafuti
Février 1987 (cyclone Uma)	Archipel ouest (houle de 5 m venant depuis l'ouest)

Décembre 1987	Funafuti (vents d'ouest – 15m/s)
Février 1988 (Cyclone Anne)	Funafuti (vents de 20m/s)
1991 (cyclone OFA)	Vaitupu
4 – 5 décembre 1991 (cyclone Val)	Tuvalu
6 au 13 décembre 1992 (cyclone Joni)	Tuvalu
26 décembre 1992 (cyclone Kina)	Tuvalu
1 janvier 1993	Tuvalu
9 janvier 1993 (cyclone Nina)	Nukufetau
11 janvier 1993 (cyclone Nina)	Vaitupu
13 janvier 1993 (cyclone Nina)	Nanumea – Nanumaga – Nukunono – Nui
16 janvier 1993 (cyclone Nina)	Nukunono
17 janvier 1993 (cyclone Nina)	Nukunono
20-21 janvier 1993 (cyclone Nina)	Funafuti
5 mars 1997 (cyclone Savin)	Tuvalu
12 mars 1997 (cyclone Hina)	Tuvalu
10 juin 1997 (cyclone Keli)	Tuvalu

d'après Hilia Vavae, 1999 et 2001³⁹ et (Sem G. et al., 1996)

Si les cyclones tropicaux se développent à proximité de l'archipel, généralement à la latitude de 9 °S, ils ne sont pas encore assez formés lorsqu'il le traverse. Toutefois, lorsque l'on consulte les ouvrages (Thompson C.S., 1987 ; Sem G. *et al.*, 1996), on ne peut qu'être surpris par l'occurrence de ce phénomène à l'échelle de l'archipel.

Ainsi, depuis 1940, l'archipel a été touché par 35 cyclones :

- 11 cyclones entre 1940 et 1970,
- 13 entre 1972 et 1985,
- 7 entre 1985 et 1992,
- 4 entre 1993 et 1997.

Ce nombre excessif pour un archipel théoriquement éloigné de la trajectoire des cyclones oblige à s'interroger sur la définition précise du cyclone tropical. Est considérée comme cyclone toute dépression ayant des vents de 64 nœuds au moins, soit 118 km/heure, alors que les Tuvaluans prennent comme références des valeurs deux fois moindres (34 nœuds soit 62 km/h). Pour eux, il faut comprendre par cyclone avis de « grand frais » ou « coup de vent » et non « violente tempête » ou « ouragan » comme nous l'imaginons.

Cela nous explique également pourquoi lors de nos entretiens, seuls l'événement de 1972 et, de façon moins soutenue, celui de 1993 marquaient les esprits alors que tant d'autres avaient fait rage

³⁹ Communication personnelle

Figure 113 : Localisation des îles tuvaluannes touchées par les principaux cyclones du XX^e siècle



sur les littoraux atolliens. Nous avons alors supposé que les autres événements du XIX^e ou du XX^e siècle n'avaient pas eu d'impacts sur les îles car la destruction matérielle marque souvent les esprits. Pourtant la consultation de manuscrits mettait en lumière des dommages importants mais rien en comparaison à Bébé :

- 1883 : les façades orientales des atolls de Funafuti et Nukulaelae sont sévèrement érodées. De nombreuses habitations sont détruites, un grand nombre de cocotiers sont couchés et les trous de pulaka⁴⁰ sont sursalés. L'atoll de Nukulaelae est victime d'une importante famine.

- 1958 : Atoll de Funafuti. On observe des dommages considérables sur les propriétés foncières et les récoltes. Une des jetées de l'île est totalement détruite par la houle cyclonique localisée dans le lagon.

- 1972 : Atoll de Funafuti. Le cyclone Bébé est responsable de six morts, de la destruction de 70 à 80 % des cocotiers ainsi que d'un très grand nombre d'habitations (à hauteur de 90 % dans l'île de Fongafale) ; (cf. Figure 114 - annexe)

- 1993 : On constate une forte activité cyclonique durant le mois de janvier. Le cyclone Kina touche successivement toutes les îles de l'archipel tuvaluan et plus sévèrement le nord. Le cyclone aborde Nanumea le 13 janvier 1993. L'île principale est partiellement inondée par des vagues cycloniques venant de l'océan et du lagon. Le littoral situé au plus proche de la passe est emporté par les vagues. Le rivage de l'île d'Hahake est érodé sur plus de 40 m. La végétation est déchaussée et les plantations situées au sein de l'île sont brûlées par l'intrusion d'eau salée. En contrepartie, un important banc de sable s'est formé dans la baie située au sud-est de l'île d'Hahake.

Le cyclone touche le secteur méridional de l'archipel le 16 janvier 1993. Dans l'île de Nuilakita, le gouvernement estime que 60 à 70 % de la production de bananes et de fruits à pain a été détruite par les vents et les embruns. Les productions vivrières de l'atoll de Nukulaelae ont été sévèrement touchées. L'extrémité septentrionale de l'île principale ainsi que deux îlots satellites ont subi une érosion importante de leurs côtes, matérialisée par le déchaussement de cocotiers matures. A l'inverse, une accumulation sédimentaire s'est créée au débouché d'une fausse passe, entre l'île principale et son îlot satellite. Composée de diverses fractions sédimentaires, de types blocs, galets et sable, cette accumulation mesurait environ cinq mètres de haut sur sa façade océanique et déclinait doucement en direction du lagon.

D'après ce que nous avons pu trouver dans les textes, et ce qui nous a été rapporté, 10 à 20 % des ressources naturelles de l'archipel ont été détruites durant cette phase cyclonique de 1993. Face à de telles situations les compensations versées par l'Etat à la population sont extrêmement faibles et ne permettent pas une remise en état rapide des zones exploitées. En effet, après un événement climatique

⁴⁰ *Cyrtosperma chamissonis* – tubercule de type taro

de cette envergure, le gouvernement tuvaluan ne verse environ qu'un dollar australien⁴¹ pour 1 m² de terre détruite.

Du fait de leur position latitudinale, les Maldives ne sont pas sujettes aux cyclones. Comme l'écrivait D.R. Stoddart (1966 ; 1971a) la dominance des espèces branchues montre l'absence de phénomènes cycloniques majeurs dans cette ceinture équatoriale, la force de Coriolis étant très négligeable à ces latitudes.

Seule, la partie septentrionale de l'archipel peut être soumise à des tempêtes lors de la remontée vers l'Inde des vents de mousson depuis la partie sud-est du bassin océanique Indien, comme le prouve la carte des événements tempétueux que nous avons élaborée à partir de diverses références bibliographiques (cf. Figure 115). Le temps le plus venteux se situe vers juin lorsque les tempêtes tropicales sont bien établies sur la mer d'Arabie et que la mousson de SW est déjà bien établie dans la région. Il peut y avoir des périodes de vents en octobre-novembre lorsque les vents arrivent depuis la baie du Bengale à la fin de la saison humide.

De par leur isolement insulaire, les Maldives peuvent être victimes de submersions ou d'inondations par des houles nées lors d'événements tempétueux lointains (cf. Figures 116, 118 – annexe) (cf. Figure 117). Ainsi, en 1987, certaines îles, et plus particulièrement celles de la partie centrale de l'archipel, comme Malé, ont été inondées. D'après Y. Goda (1987), la houle serait issue d'une tempête localisée dans l'Ouest australien. Cette affirmation nous surprend car, d'après toutes les sources bibliographiques ou photographiques que nous avons pu consulter, les houles ont frappé l'ensemble des côtes insulaires depuis une direction sud-ouest. Comme l'inondation de l'île de Thulhadhoo, située dans l'atoll de Baa, a été causée par des vagues estimées entre 2 et 2,5 m de haut, suivant une périodicité de 12 à 15 secondes, associées à des vents de sud-ouest (Pernetta J.C., 1989a). Durant cet épisode, l'Etat estime qu'environ 30 % (Pernetta J.C., 1989a) des terres artificielles dans la partie sud de Malé ont été emportées par les vagues.

Une étude, réalisée par J. Merrill *et al.* (1988), a tenté d'expliquer ce phénomène en analysant les données sismiques ainsi que les données climatiques à une échelle locale puis à une échelle plus globale, au niveau de l'océan Indien. Concernant l'hypothèse d'une activité sismique non localisée, le Centre Australien de Sismologie n'a enregistré aucun événement majeur pouvant créer de telles vagues. D'après l'analyse des conditions climatiques, il a été estimé qu'aucun vent local ou lointain n'avait pu créer de telles vagues. Les conclusions préliminaires du rapport estiment que leur origine reste floue mais qu'il ne s'agit pas d'événements exceptionnels car J.S. Gardiner (1903) mentionnait déjà leur existence au début du XX^e siècle. Elles doivent se produire de façon périodique suivant des intervalles estimés entre 10 et 50 ans (Merrill J. *et al.*, 1988).

⁴¹ environ 0,60 euros.

Figure 115 : Recensement des îles maldiviennes touchées par des événements tempétueux

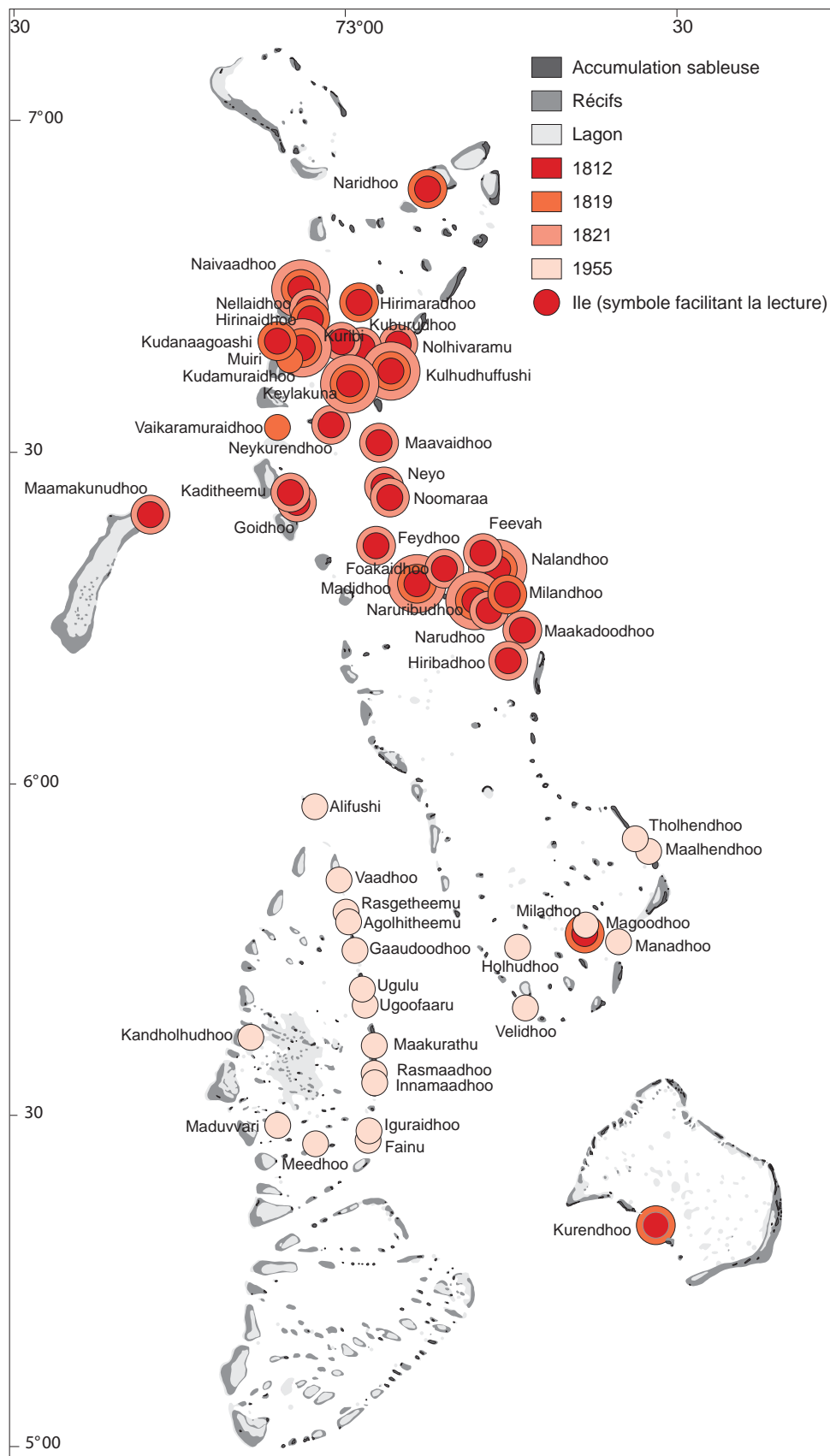
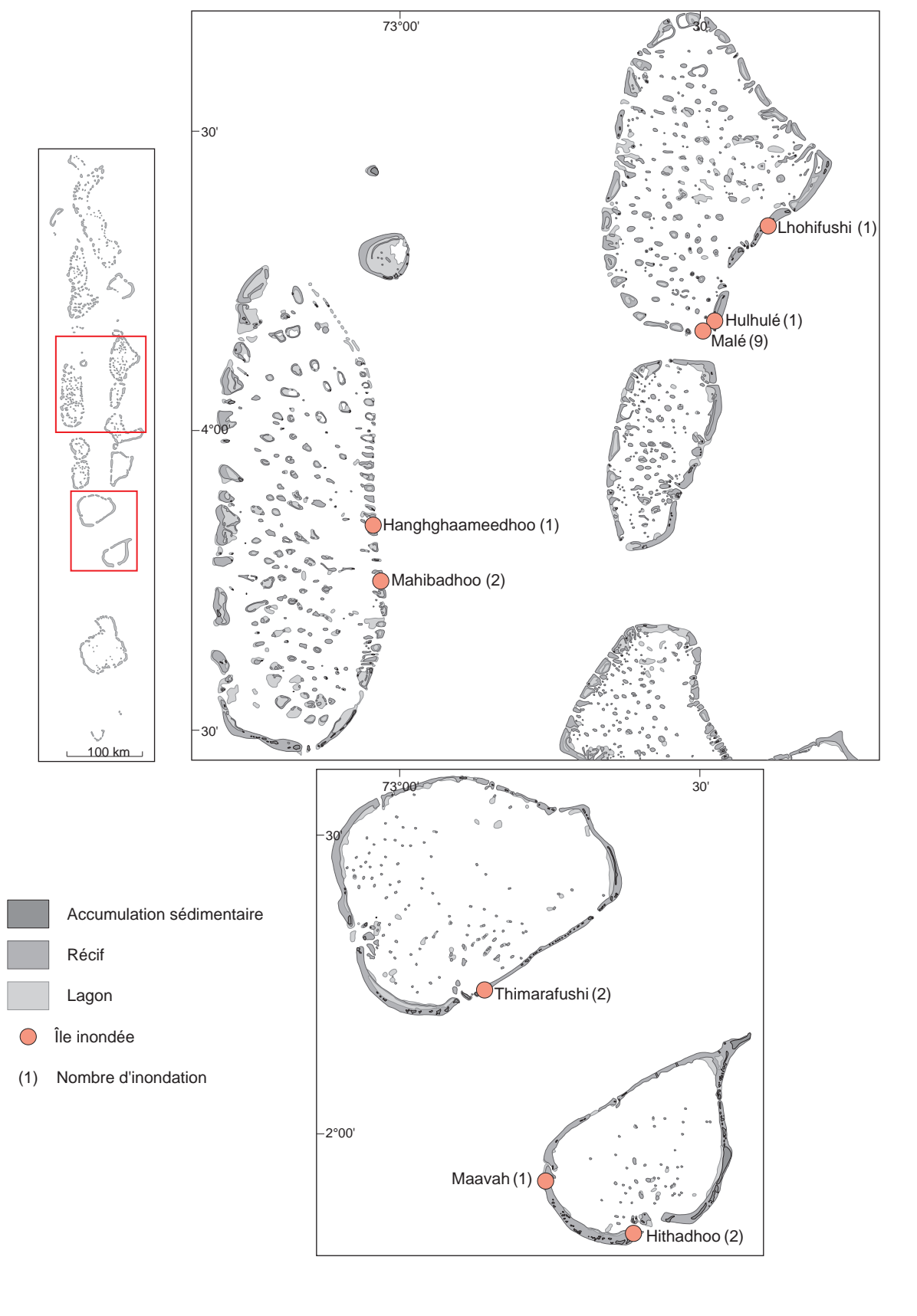


Figure 117 : Localisation et occurrence des îles inondées dans l'archipel des Maldives



Même rares, ces vagues sont responsables de dommages qui impliquent des coûts importants notamment sur les îles artificielles. Les aménagements littoraux jouant un rôle d'accentuation d'érosion.

L'impact ciblé des vagues nous laisse supposer une origine locale, sous-marine, de type effondrement, plutôt que des événements météo-marins ou sismiques, impliquant une action plus régionale non seulement sur les côtes maldiviennes mais également sur les côtes sri-lankaises ou indiennes.

5.3.2. Les conditions pluviométriques

Comme pour les données anémométriques, nous avons souhaité travailler à partir de plusieurs échelles d'analyse comme des moyennes mensuelles, des moyennes décennales, des moyennes pluri-décennales.

Les Tuvalu disposent curieusement d'une longue série de données pluviométriques, de 1927 à 1999 exprimées en millimètre, qu'elles ne possèdent pas pour les enregistrements thermiques ou anémométriques. La courbe de tendance sur l'ensemble de ces 72 années montre une légère décroissance des précipitations dans l'atoll de Funafuti (cf. Figures 119, 123) (Figures 120, 121, 122, 124 - annexe) avec une diminution des extrêmes à partir de l'année 1973. Il ne s'agit pas d'une baisse continue puisque les valeurs des décennies 1927-1937 puis 1971-1981 sont quasi identiques, alors que celles de 1938-1948 représentent la décennie pluvieuse de l'archipel avec une moyenne annuelle de 338 mm, mais la baisse est toutefois effective. A l'échelle des mois et des années, on observe de légères modifications mais rien de significatif. Les mois pluvieux vont décembre à mars, avec des précipitations qui oscillent entre 300 et 450 mm. Elles se situent entre 175 et 275 mm de mai et septembre, les mois d'avril, d'octobre et de novembre s'orientant vers les valeurs hautes ou les valeurs basses de la série selon les années.

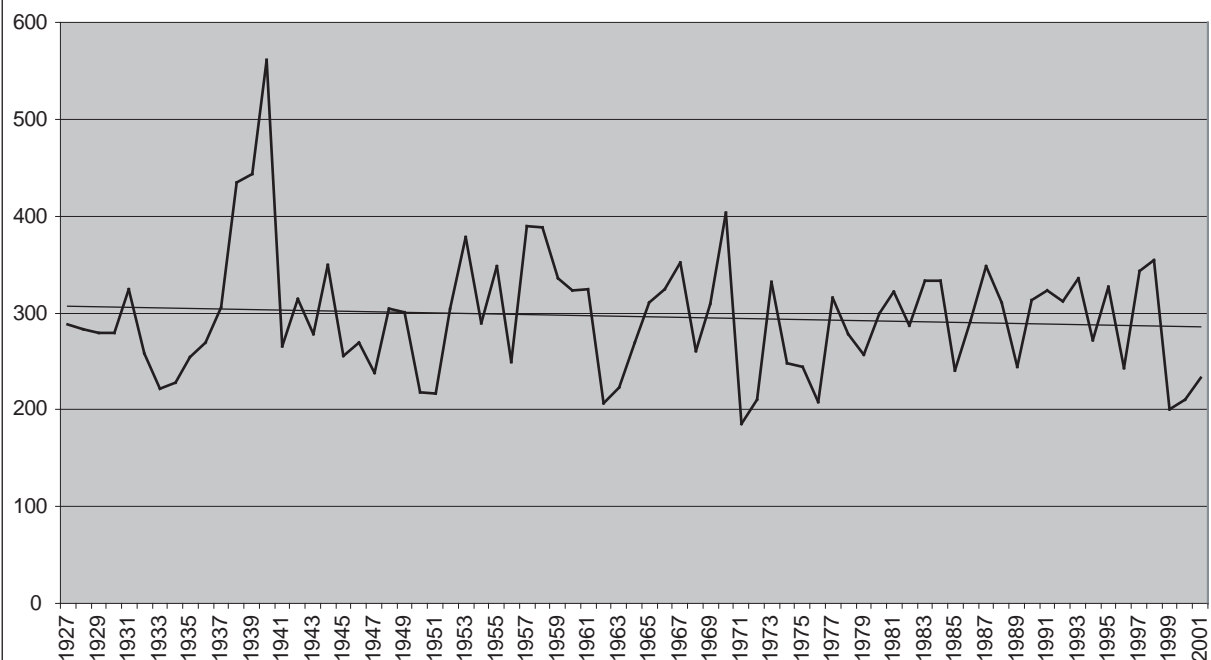
En résumé, nous avons une décroissance des pluies entre janvier et avril, puis une stagnation à un faible niveau jusqu'à août-septembre avant le retour des précipitations.

D'après les réponses apportées lors de nos entretiens, « la pluie ne vient que la nuit » à Fongafale où elle tombe, en effet, souvent sous la forme d'importantes averses avec une fréquence nocturne plus élevée, conséquence du conflit avec la brise de terre (Estienne P. et Godard A., 1970).

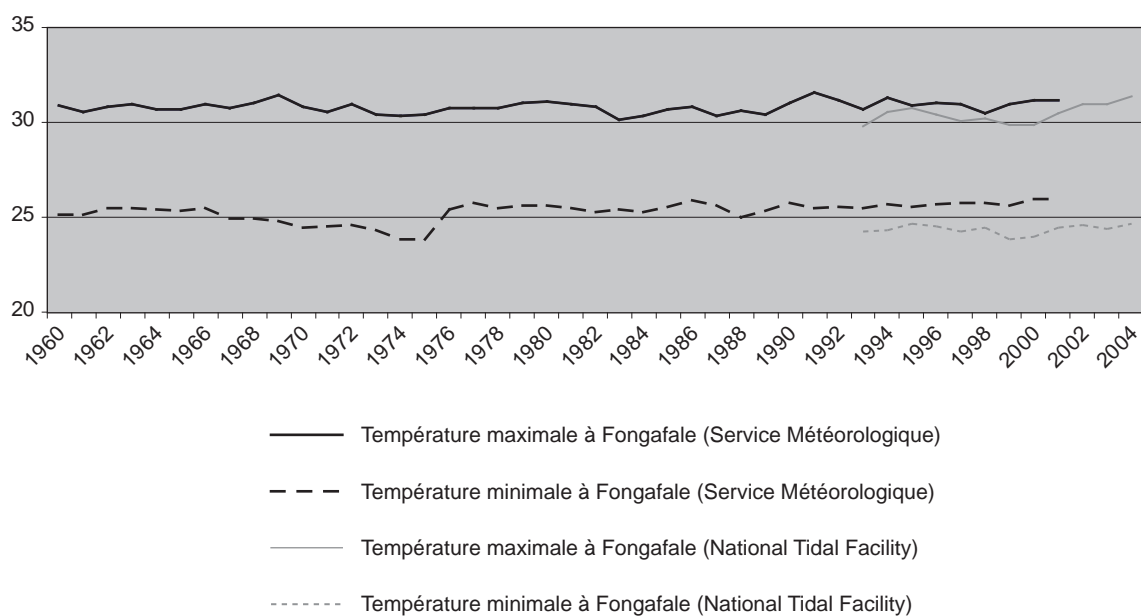
Aux Maldives, la tendance pluviométrique est légèrement à la baisse pour la série des années 1967-2002 (36 ans d'observations – cf. Figures 125, 127) (Figure 126 - annexe). Cette baisse est toutefois moins marquée dans l'archipel sud où les précipitations sont largement supérieures à celles de l'archipel nord. Pour l'ensemble des séries, mensuelle, annuelle et décennale, on retrouve une quasi-absence de précipitations pour les mois de janvier à mars, bien que la tendance s'atténue pour le mois de janvier à l'échelle de la distribution décennale. La saison sèche dite « de calme » est connue

Figure 119 : Variabilité climatique dans l'île de Fongafale, archipel des Tuvalu

En terme de précipitations, de 1927 à 2001 :



En terme de température de 1960 à 2001 :



- Température maximale à Fongafale (Service Météorologique)
- - - - Température minimale à Fongafale (Service Météorologique)
- Température maximale à Fongafale (National Tidal Facility)
- - - - Température minimale à Fongafale (National Tidal Facility)

Figure 123 : Distribution mensuelle des précipitations dans l'atoll de Funafuti de 1971 à 1992

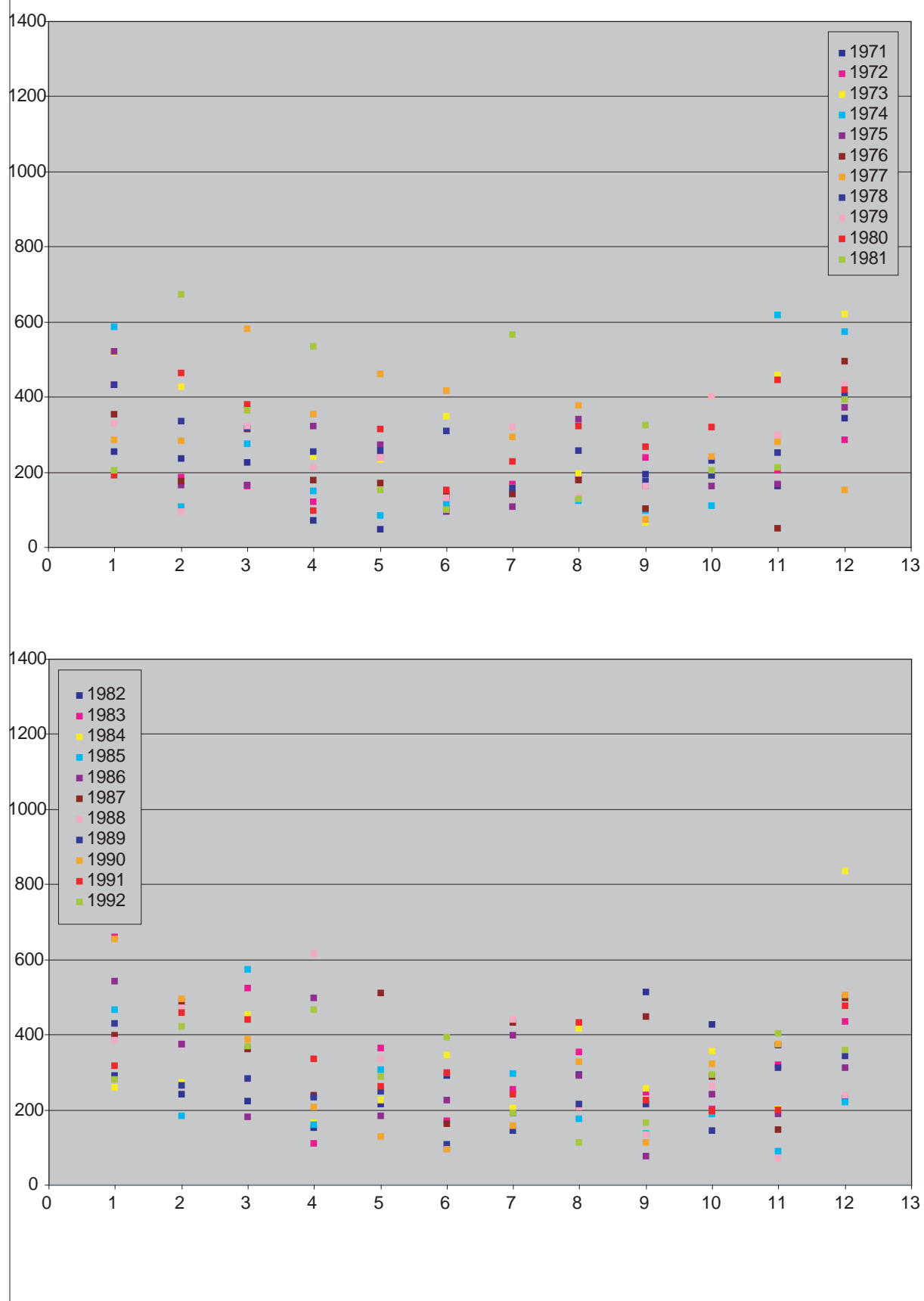


Figure 125 : Variabilité climatique dans les stations de Gan et d'Hulhulé entre 1967 et 2002

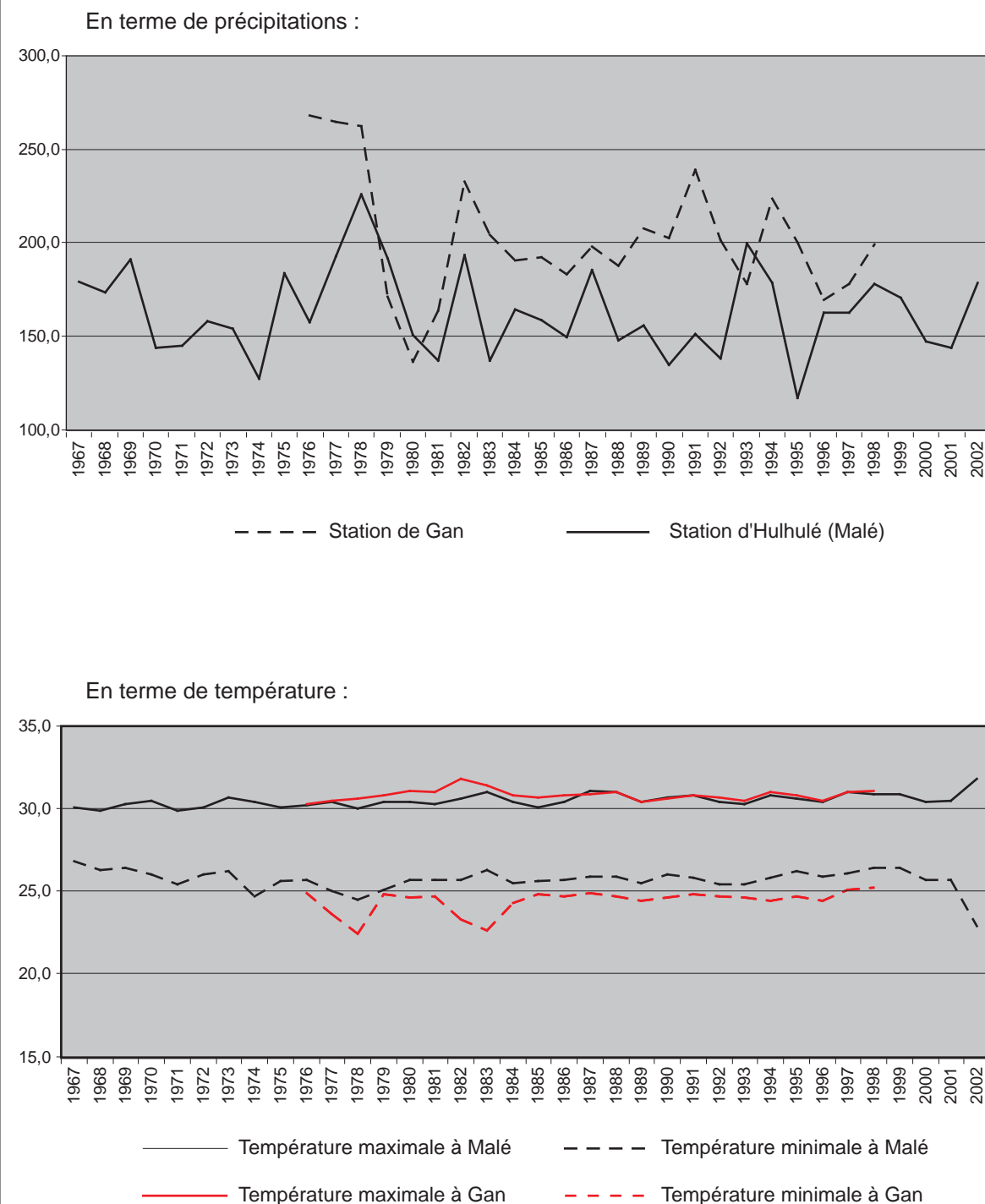
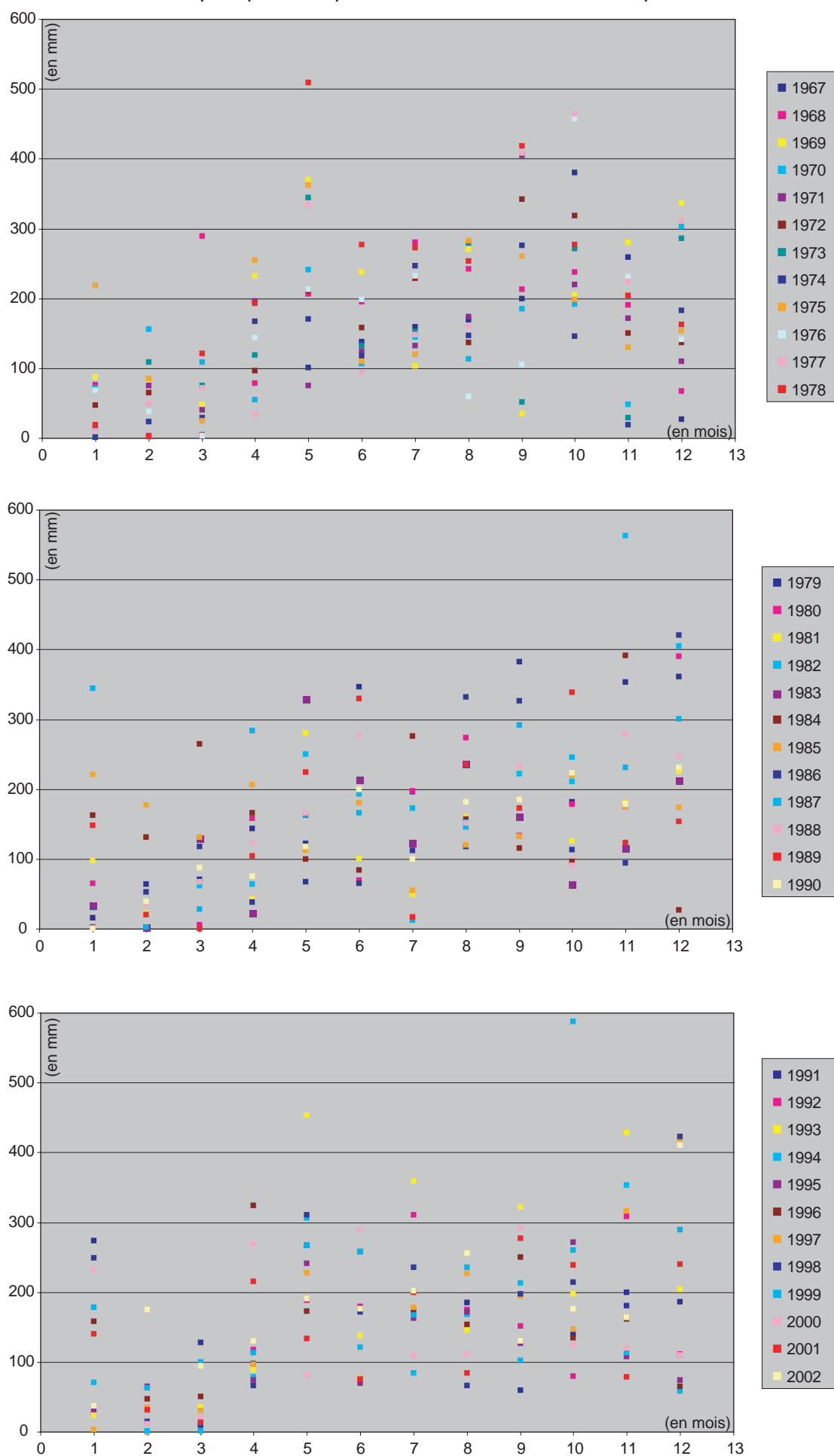


Figure 127 : Evolution décennale des précipitations pour le secteur central de l'archipel des Maldives



aux Maldives sous le nom de l'*iruvai*. Elle est associée à des vents évoluant entre 50 et 150°. On parle de « mousson » sèche d'hiver. Inversement, d'avril à décembre, même si ponctuellement nous pouvons avoir de légères modifications, nous sommes en présence d'une saison pluvieuse avec des moyennes de précipitations mensuelles comprises entre 150 et 300 mm. Certains mois comme mai, septembre, octobre et désormais décembre peuvent recevoir 400, voire 600 mm de pluie. Si la distribution des précipitations à l'échelle des années semble être bien répartie, certaines années comme 1978 ou 1994 ont été pluvieuses alors qu'à l'inverse, 1999 a été sèche. La saison pluvieuse et venteuse, avec des vents de secteur ouest, qui correspond à la mousson humide d'été est connue aux Maldives comme l'*hulhugandu*. Il existe conjointement un calendrier traditionnel des saisons, le *nakaiy*, qui est basé sur des cycles empiriques, lunaires et climatiques. Cette organisation divise l'année en 27 sections de 13 ou 14 jours auxquels est associé un cycle climatique particulier, sec et venteux ou pluvieux et venteux... Initialement, chaque cycle était propice à une activité comme, par exemple, la pêche, ou l'agriculture, mais les insulaires considèrent désormais ce calendrier comme peu fiable.

La décennie 1991-2002 a exacerbé les tendances de sécheresse, notamment pour les mois de février à mars mais, au cours de l'année, elle s'est située dans la moyenne des autres mesures.

De la même façon que nous avons pu noter des différences dans les orientations majeures des vents entre nos observations et les données figurant dans les ouvrages généraux sur les Maldives, nous avons également constaté que les saisons étaient inversées.

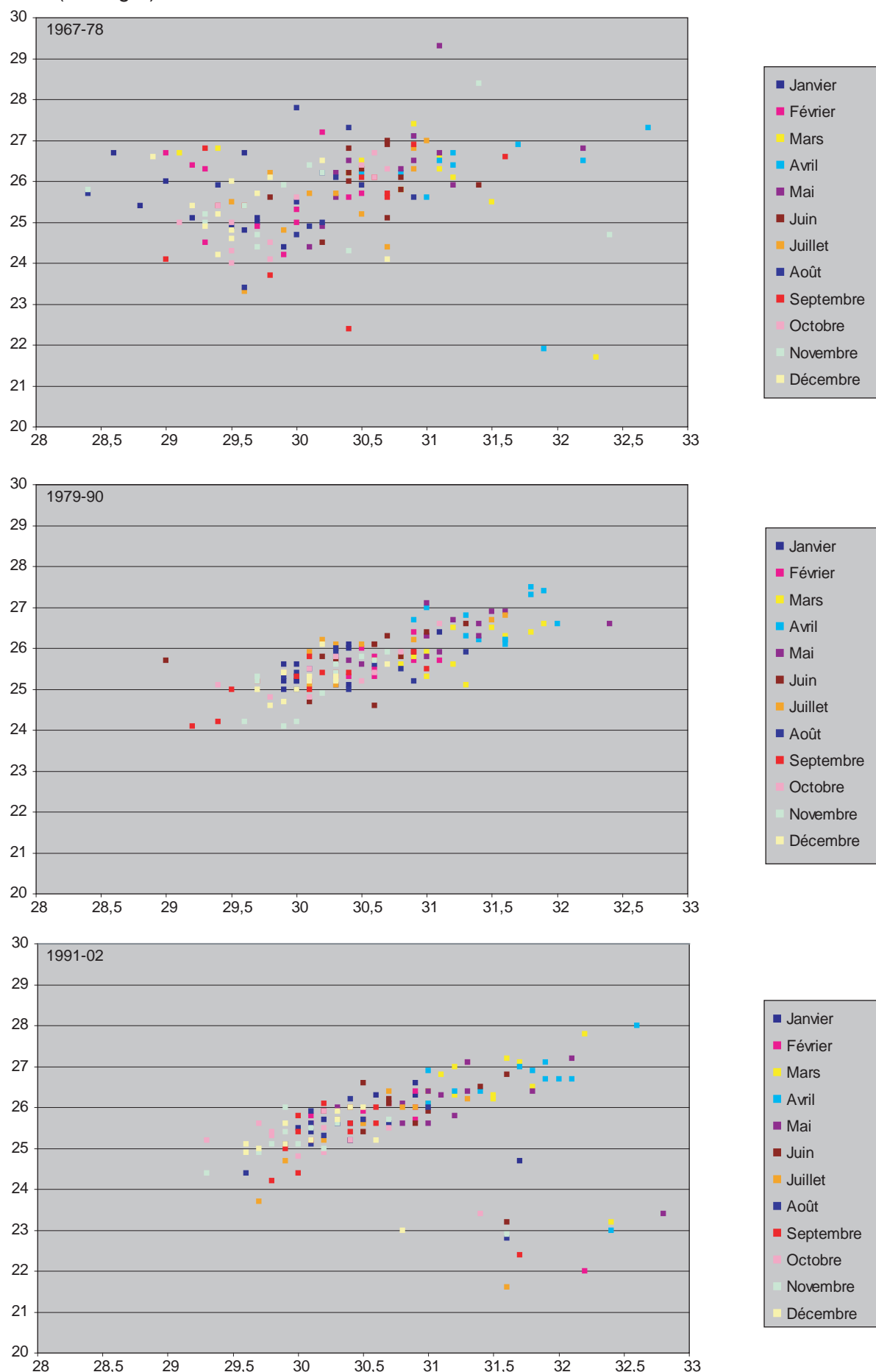
Que doit-on penser alors des caractéristiques pluviométriques en périodes chaudes, sachant que de l'Optimum Climatique Holocène à l'optimum climatique des années 1930-1960, les précipitations se sont révélées abondantes (Leroux M., 2000).

5.3.3. Les conditions de température

Les données analysées concernent les séries distribuées entre 1967-2002 pour les Maldives et 1960-2001 pour les Tuvalu. La courbe pluri-décennale de Malé (cf. Figure 125) montre des oscillations sur l'ensemble de la période sans dégager une véritable tendance positive ou négative à l'échelle de l'archipel. Seule la fin de la courbe montre une augmentation des températures maximales et une baisse pour les minimales. La comparaison entre les courbes de Gan et de Malé montre que l'amplitude thermique est plus importante dans le sud de l'archipel puisque la courbe des maximales est légèrement supérieure à celle de Malé et est inférieure pour les minimales.

D'après les analyses plus fines que nous avons réalisées sur les trois décennies (cf. Figures 128 – annexe et 129), nous observons une augmentation de la température sur les périodes 1979-1990 et 1991-2002 par rapport à 1967-1978. Les températures maximales oscillaient alors entre 29,8 °C et

Figure 129 : Distribution mensuelle des moyennes de températures (maximales et minimales) dans l'archipel des Maldives (en degré)



30,5 °C, et désormais, elles se situent entre 30 °C et 31 °C, voire 31,8 °C pour l'année 2002. Cette année est d'ailleurs exceptionnelle car, à la donnée maximale enregistrée depuis 1960, il convient de rajouter la donnée minimale jamais atteinte en 36 années d'observations, à savoir 22,9 °C. S'agit-il d'une année exceptionnelle ou doit-on y voir les prémices de changements à venir ?

Sur les trois décennies, l'écart des minimales a également tendance à se réduire. Les différentiels successifs ont été évalués à partir des températures de 24,5 °C et 27 °C, pour la décennie 1967-1978, puis de 25 °C à 26,3 °C et 25,4 °C et 26,4 °C pour les deux séries suivantes. Ainsi, le seuil des températures minimales et maximales tend à augmenter depuis 1967.

Si la distribution des températures suivant les mois ne dégageait aucune tendance générale entre 1967 et 1978, les relevés effectués depuis 1979 se sont révélés plus parlants. En effet, nous observons que les mois les plus chauds sont ceux de mars, avril et mai, alors que les plus froids sont ceux de septembre à décembre, la température des mois de janvier et février augmentant très régulièrement.

Aux Tuvalu, la courbe générale des températures maximales enregistrées entre 1960 et 2001 (cf. Figure 119) par le service météorologique de Fongafale ne montre pas de changement notable, seule la courbe minimale amorçant une légère régression jusqu'en 1976 avant de retrouver le niveau initial. Il est intéressant de noter que les valeurs enregistrées par le *National Tidal Facility* montrent des enregistrements légèrement inférieurs à ceux du service météorologique.

La distribution mensuelle des températures (cf. Figures 130, 131 – annexe) permet de dégager quelques tendances comme pour le mois d'août qui reste le mois le plus frais et cela depuis les années 1960 et les mois de novembre et décembre qui sont les plus chauds. La distribution devient ensuite trop dispersée pour qu'on puisse en déduire des informations.

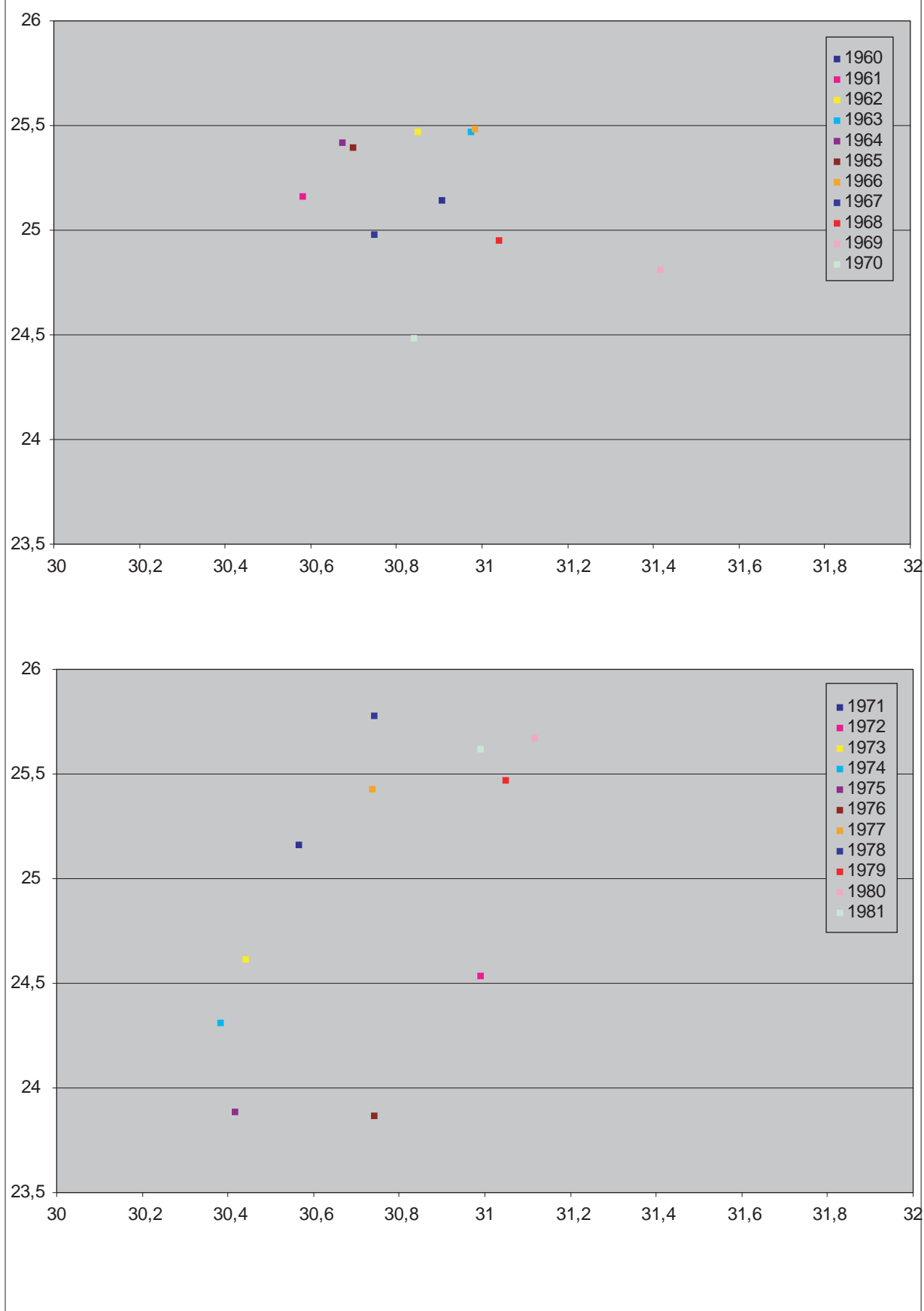
A l'instar de ce qui a été observé précédemment pour l'archipel maldivien, la dispersion au sein des minimales s'amoindrit comme, par exemple, pour le nuage de points de 1971 à 1981 qui montre une dispersion entre 23 °C et 26,5 °C puis 24,5 °C et 26,5 °C pour la décennie 1993-2001. A l'échelle des maximales, rien n'a évolué puisque à l'exception du mois de mars 1994 où la température de 32,5 °C a été atteinte, les températures oscillent entre 29,8 °C et 31,8 °C.

Les moyennes annuelles (cf. Figures 132 – annexe, 133 - annexe) confirment une tendance au regroupement ainsi qu'à une augmentation des températures minimales, alors qu'on note une très légère augmentation pour les maximales qu'il faudrait confirmer.

5. 4. Le phénomène El Niño et son influence sur les conditions climatiques

Le phénomène El Niño a été observé pour la première fois au milieu du XVI^e siècle. Jusqu'à présent, on estimait que le premier épisode était survenu il y a 4 000 ans et que le premier « méga-Niño » avait frappé les côtes péruviennes 1 600 ans avant J.-C. (Bonnet N., 1998). Les dernières recherches (Schaaf et Thurow, 1997, Hugu *et al.*, 1999, Bull *et al.*, 2000 in (Vannev J-R., 2002)) montrent que le système

Figure 130 : Distribution des moyennes de températures annuelles dans l'atoll de Funafuti (en degré)



intertropical fluctuait déjà en mode El Niño, proche de l'actuel, durant le dernier épisode interglaciaire.

5.4.1. Son fonctionnement

En région intertropicale, l'océan répond rapidement aux changements du régime des vents. La circulation océanique est associée aux alizés qui entraînent avec eux les eaux de surface. Il s'ensuit une accumulation de ces dernières dans l'ouest du bassin Pacifique qui se traduit par une élévation du niveau de la mer, ainsi que par de fortes pluies, issues des vents qui se sont chargés en humidité durant leur traversée de l'océan. La thermocline est inclinée dans le sens opposé à l'élévation du niveau de la mer. En période normale, le long des côtes péruviennes et chiliennes, des eaux froides remontent à la surface apportant avec elles des eaux riches en sels nutritifs (phénomène d'upwelling).

De grandes quantités d'énergie sont donc transportées en quelques mois d'un bord à l'autre du bassin océanique. Les changements de température de surface qui en résultent ont alors des effets déterminants sur la circulation de l'atmosphère : les océans tropicaux constituant de véritables « chaudières naturelles » s'ajustent rapidement aux modifications du vent.

Lors du déclenchement du phénomène El Nino, les alizés s'affaiblissent et s'inversent provoquant une accumulation des masses d'eaux chaudes sur les côtes orientales du Pacifique tropical. L'accumulation se fait par vagues d'ondes successives, à une vitesse de 290 km/jour, créant une accumulation progressive du niveau de la mer sur les côtes péruviennes. De tels changements environnementaux ont des conséquences écologiques et économiques importantes. Ainsi, des transferts de chaleur considérables se font entre l'océan et l'atmosphère. Des nuages se forment par convection au-dessus des masses d'eau chaude et provoquent des cyclones ainsi que d'importantes pluies sur les îles du Pacifique et sur les continents voisins. Les variations de la température de l'océan Pacifique provoquent une raréfaction du phytoplancton et ont un impact direct sur le secteur des pêches, qui est le secteur économique majeur du Pérou et/ou du Chili. Comme la thermocline se redresse, les eaux froides sont incapables de remonter le long des côtes d'Amérique du Sud, ce qui entraîne la disparition du phénomène d'upwelling. Les eaux restent chaudes, les sels nutritifs se raréfient, la production décline. A l'inverse, les côtes occidentales du Pacifique tropical se refroidissent, ce qui se traduit par une sécheresse des terres. On attribue ainsi au phénomène ENSO⁴² les 9 millions d'hectares brûlés sur les îles de Sumatra et Bornéo entre 1997 et 1998, ainsi que les 570 000 hectares qui ont été détruits entre décembre 2001 et janvier 2002 en Australie.

En situation de Nina, la surface de la mer est plus élevée à l'ouest qu'à l'est. La pente de la thermocline s'accroît provoquant son enfoncement au niveau du Pacifique ouest et son relèvement

⁴² El Niño Southern Oscillation

sur le Pacifique est. Les alizés se renforcent et créent des conditions plus froides que la normale. La zone des précipitations se positionne plus à l'ouest, avec des pluies abondantes sur l'Indonésie. Le phénomène d'upwelling s'intensifie sur les côtes d'Amérique du Sud provoquant un bloom planctonique ayant une répercussion directe sur la pêche et, plus particulièrement, sur la production des anchois.

Tableau 8 : Récurrence du phénomène pour la décennie 1990

El Nino	La Nina	Conditions normales
Novembre 1992 (+ 10 cm/au niveau moyen)		
		Novembre 1993
Novembre 1994 (+ 15 cm/au niveau moyen)		
	Novembre 1995	
	Novembre 1996	
Novembre 1997 (± 20 cm/au niveau moyen)		
	Novembre 1998	
	Novembre 1999	
		Novembre 2000

d'après Topex-Poséidon – <http://topex-www.jpl.nasa.gov/>

En 1992, 1994 et 1997, le niveau des mers a progressé de façon conséquente, respectivement de 10, 15 et ± 20 cm, bien que, pour S.M. Solomon et D.L. Forbes (1999), il s'agisse de changements saisonniers peu influents. En 1982-1983, durant un épisode ENSO plus important, le niveau relatif dans l'archipel des Kiribati s'est élevé de + 50 cm (Woodroffe C.D. et Mclean R.F., 1992). Cette progression est la conséquence directe du phénomène El Niño sur les bassins océaniques, qui peut avoir des répercussions sur le niveau moyen des mers sans pour autant que ce dernier reflète nécessairement une tendance globale au réchauffement climatique.

Si l'on s'intéresse à la variabilité du phénomène sur plusieurs décennies notamment depuis 1935, on s'aperçoit qu'il y a eu onze « épisodes chauds » correspondant à un phénomène El Niño. L'intensité et la récurrence du phénomène semblent toutefois s'accroître. Jusqu'au début de la décennie 1980, c'est un phénomène ponctuel sans réelle périodicité. A l'heure actuelle, il apparaît comme banal tant il se reproduit souvent. Cet accroissement de fréquence depuis les années 1970 résulte, d'après M. Leroux (2000), du glissement vers le sud de l'Equateur météorologique avec un renforcement de la dynamique boréale.

Nous avons réalisé, à partir des données brutes fournies par la Nasa (1950-2003) une analyse des anomalies ENSO qui apparaissent avec une fréquence accélérée : 1963, 1969, 1972, 1979-1980, 1982-1983, 1986-1987, 1990-1998, 2001-2003 (cf. Figure 134 - annexe).

5.4.2. Les incertitudes concernant l'impact climatique d'El Niño

Les coraux peuvent devenir, dans le cas d'études climatiques, des paléo-thermomètres nous informant ainsi sur les épisodes El Niño antérieurs et jouant le rôle « d'archives du climat » (Camoïn G.F. et Montagnioni L.F., 1995).

Les études récentes cherchent à démontrer que le phénomène El Niño contribue au réchauffement climatique. Dans les travaux réalisés sur l'atoll de Maiana (Kiribati), des chercheurs (Urban F.E. *et al.*, 2000) ont mis en évidence une relation causale entre le phénomène El Niño et le réchauffement climatique. Ils observent, en effet, une recrudescence du phénomène dans le Pacifique ouest. Leurs observations menées sur une période de 155 ans montrent que, d'une fréquence de 10 à 15 ans à la fin du XIX^e siècle, El Niño se produit tous les trois ans au début du XX^e et est accompagné d'une augmentation significative de la température moyenne dans le Pacifique ouest. Ils estiment qu'à partir de 1976 intervient à nouveau une rupture climatique, avec une périodicité du phénomène établie sur quatre ans et une augmentation de la pluviométrie. Ainsi, l'étude apporte de nouvelles preuves de la relation entre l'intensification du phénomène El Niño et le changement du climat. De leur côté, les modifications du cycle hydrologique tropical, dues aux émissions de gaz à effet de serre, ont des conséquences directes sur la fréquence accrue d'El Niño. Une étude⁴³ réalisée sur l'île de Moorea, pour une période d'observation de 137 ans, montre des conclusions quasi-similaires à celles évoquées précédemment. Pourtant, les résultats de ces recherches ne font pas l'unanimité dans le monde des paléoclimatologues. Certains (Corrège T. *et al.*, 2000) estiment que les deux phénomènes ne sont pas liés, leur démarche ayant été sensiblement différente : pour eux, il y a effectivement une intensification du phénomène El Niño depuis les deux dernières décennies dont il est nécessaire de rechercher l'origine. Est-ce le résultat de l'interaction de phénomènes océaniques naturels ou de l'intervention d'éléments extérieurs comme les gaz à effet de serre ? Ce questionnement impose un temps d'observation beaucoup plus important. Il faut sélectionner des échantillons coralliens qui ont vécu avant les premières émissions des gaz à « effet de serre additionnel ». D'après les observations qu'ils ont faites sur deux sites récifaux datant du Petit Âge glaciaire⁴⁴, l'un aux Vanuatu et l'autre au large de la Nouvelle Calédonie, le refroidissement enregistré n'a en rien modifié l'occurrence et l'intensité des événements de type El Niño. Des travaux menés sur la période de l'Holocène moyen, qui est la plus proche de la nôtre en terme de température de surface de l'océan, de durée d'ensoleillement et de niveau de la mer, ont permis de montrer que, si la température océanique était similaire à la température actuelle, ses variations saisonnières et interannuelles étaient plus importantes. Ainsi, El Niño apparaissait comme beaucoup plus intense qu'aujourd'hui. Toutefois, des différences ont été observées. Les variations saisonnières des températures océaniques sont actuellement comprises entre

⁴³ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

⁴⁴ entre 1701 et 1761

2 et 4 °C, alors qu'il y a 4 200 ans, celles-ci pouvaient être inférieures ou supérieures, selon la période considérée. Ainsi en 2 200 avant J.-C. elles atteignaient 5-6 °C, puis 2 °C à partir de 2 199 avant J.-C. et seulement 1 °C entre 2 193 et 2 189 avant J.-C. Les chercheurs (Corrège T. *et al.*, 2000) ont interprété ces anomalies thermiques comme une intensification du phénomène ENSO. Ainsi, les phénomènes de type El Niño étaient deux à trois fois plus intenses qu'aujourd'hui, avec une diminution moyenne de la température océanique de surface de 1,5 °C, contre 0,5 °C actuellement, alors que les épisodes La Niña étaient plus longs, entre 3 et 5 ans contre 1 et 2 ans actuellement.

Les chercheurs émettent l'hypothèse selon laquelle l'intensité d'ENSO pourrait avoir été modulée par des variations climatiques qui se manifesteraient à une échelle interdécennale. Ainsi, les phénomènes majeurs seraient donc indépendants « du moins jusqu'à un certain seuil de baisse ou d'augmentation des températures de surface » (Corrège T. *et al.*, 2000).

Si pour l'OMM⁴⁵ et la NOAA⁴⁶, le phénomène El Niño contribue au réchauffement du globe en battant des records de température, comme, par exemple, en 1997 qui a été l'année la plus chaude depuis le début des relevés mondiaux en 1856 et qui correspond à un très vigoureux épisode ENSO, pour d'autres scientifiques, également de la NOAA, El Niño freinerait au contraire le réchauffement de la planète. Des chercheurs de cet organisme ont trouvé qu'entre 1991 et 1994, années El Niño, l'océan Pacifique a rejeté 30 à 80 % de CO₂ en moins dans l'atmosphère. Selon l'étude de la NOAA, le Pacifique équatorial a relâché 900 millions de tonnes de CO₂ en 1996, année normale, contre 300 millions en 1992, année El Niño.

Les scientifiques ont évalué que le CO₂ présent dans l'atmosphère en calculant la quantité d'énergie fossile brûlée. Chaque année, 2 milliards de tonnes sont manquantes. Selon la NOAA, une réduction des rejets de CO₂ du Pacifique durant les épisodes El Niño pourrait expliquer 16 à 36 % du CO₂ manquant. De plus, il a été montré que les épisodes El Niño contribuaient à la croissance végétale, réduisant ainsi la concentration de CO₂ de l'atmosphère. Le Pacifique nord absorbe également le CO₂ rejeté par les océans tropicaux, ce qui en fait un des plus importants « puits de carbone » à la surface du globe. L'intérêt d'un épisode El Niño dans ce cas précis est qu'il intensifie ce processus en entraînant la décroissance des alizés, si bien que les eaux froides, riches en CO₂, ne peuvent remonter à la surface et rejettent de fait moins de CO₂ dans l'atmosphère.

Très récemment, des chercheurs (Tsonis A.A. *et al.*, 2003) ont montré que la variabilité de l'événement El Niño influait sur les changements de température globale. Effectivement, pour ces auteurs, ce phénomène contribue au renversement des tendances positives de la températures globale à l'inverse de La Nina.

⁴⁵ Organisation Météorologique Mondiale

⁴⁶ National Oceanic and Atmospheric Administration

En fait, « les simulations numériques qui tentent de démontrer un lien entre El Niño et le changement global sont encore trop théoriques pour être concluantes » selon P. Delecluse⁴⁷. D'autre part, elles remettent en cause les conclusions obtenues par les paléoclimatologues.

Il faut toutefois être prudent concernant l'interprétation que l'on peut faire des différentes études. En effet, les données actuelles disponibles pour les interprétations ne sont peut-être pas représentatives sur le long terme et ne permettent pas de mesurer la variabilité de manière fiable.

A ce phénomène *stricto sensu*, il faut ajouter une élévation temporaire du niveau de la mer, liée à l'augmentation de la densité des molécules d'eau, qui peut créer ponctuellement une surcote entre 15 et 20 cm au-dessus du niveau actuel.

Un temps d'observation plus important nous semble nécessaire pour apprécier le rôle exact des épisodes de type El Niño dans les changements océaniques contemporains. Ce phénomène rare et puissant est-il la conséquence ou le moteur des changements constatés ?

5.5. Le blanchiment des coraux : un phénomène associé ?

Il ne s'agit pas d'un événement récent. D'après T.J. Goreau et R.L. Hayes (1994), c'est un phénomène qui est largement quantifiable depuis 1979. Pour faciliter leur étude, les auteurs ont divisé la zone intertropicale en dix sous-provinces récifales, (1) l'océan Atlantique central, (2) l'océan Atlantique périphérique, (3) le Pacifique NW, (4) le Pacifique SW, (5) le Pacifique E, (6) le Pacifique SE, (7) le Pacifique central, (8) l'océan Indien W, (9) l'océan Indien central, et (10) l'océan Indien E, afin d'observer la recrudescence du phénomène dans chacune de ces provinces (cf. Figure 135). Les Maldives et les Tuvalu se situent respectivement dans les provinces 9 et 7. Dans la dernière décennie, seul l'événement de 1998 a affecté l'ensemble des provinces, ce qui montre ainsi l'intensité de ce phénomène.

Dans l'archipel des Maldives, les phases de blanchiment ont été nombreuses puisque les données enregistrées concernent les années 1977, 1987, 1991, 1994-1995, 1998 et, plus récemment, le mois d'avril 2000 (U.N.D.P., 2000) et le mois d'octobre 2000 (cf. Figure 136).

Après l'événement exceptionnel de 1998, les coraux étaient à nouveau en bonne santé (Rajasuriya A. *et al.*, 2000), bien qu'ils aient connu une phase de blanchiment importante en 1987 due à une élévation de la température dans les lagons, entre 2 à 3 °C (Pernetta J.C. et Elder D.L., 1992). Des surveillances effectuées ultérieurement par le *Marine Research Centre* (1999) sur différents atolls de l'archipel ont montré que les sommets des récifs n'étaient plus recouverts que par 2 % de corail vivant, notamment

⁴⁷ Université Paris VI

Figure 135 : Nombre de provinces récifales affectées par les phases de blanchiment entre 1979 et 1998 (d'après Goreau T.J. et Hayes R.L., 1994 et Hoegh-Guldberg O., 1999)

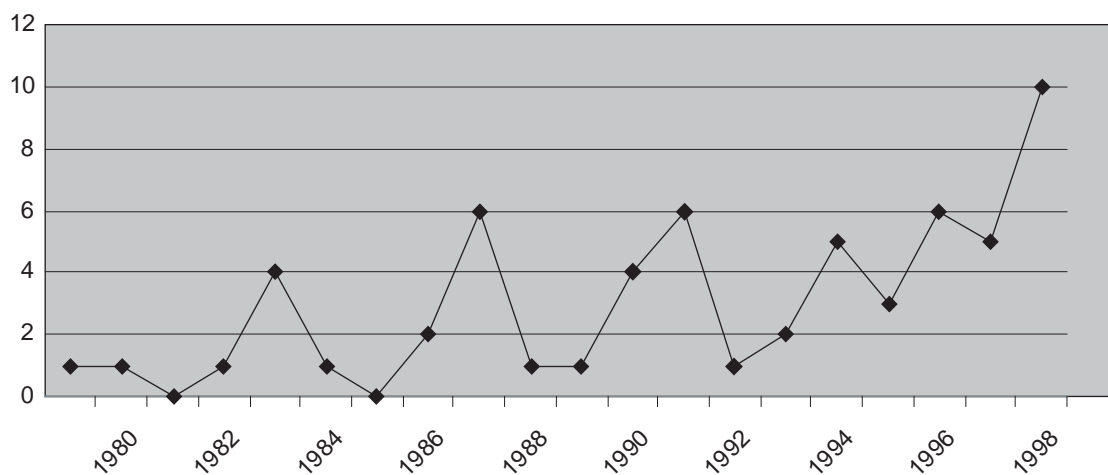
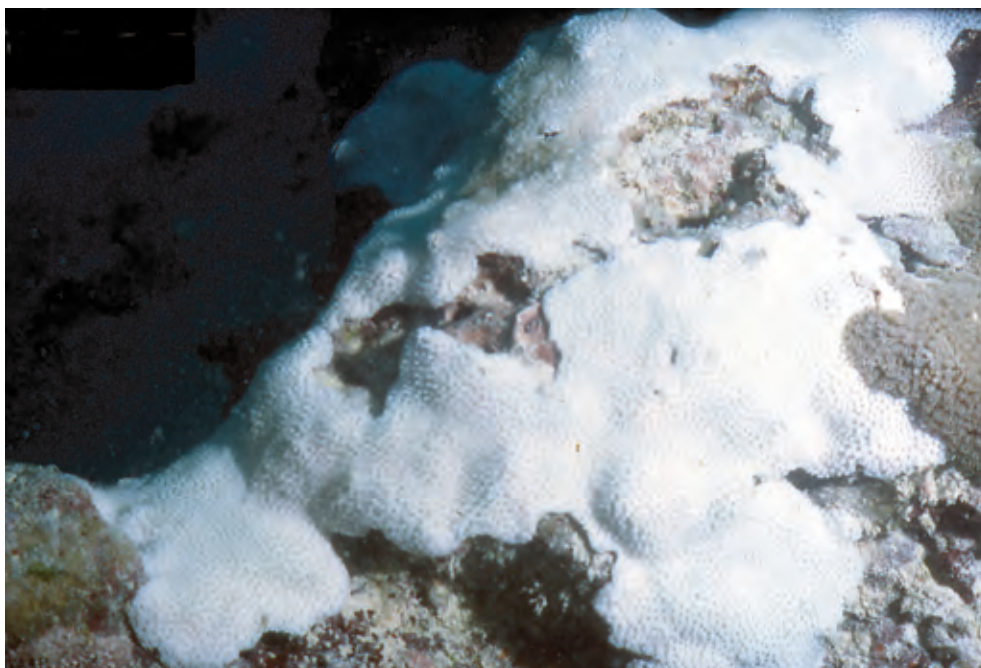


Planche 136 : Blanchiment en cours dans la passe SW de l'atoll de Goidhoo (- 20 m)



(Cliché de J.L. - 14.10.00)

dans les atolls de Haa Dhaal, Malé nord et sud, l'atoll d'Ari ainsi que ceux de Vaavu et de Seenu. Pourtant, les plongées effectuées en 2001 dans l'atoll de Seenu, par les membres de la commission *INQUA*, montraient des récifs pratiquement intacts avec des colonies adultes n'ayant pu s'édifier en moins de deux ans. D'après l'enregistrement des températures lors du grand blanchiment de 1998 par la NOAA, une poche d'eau froide a séjourné pendant quelques semaines sur l'extrême sud de l'archipel pouvant expliquer certainement cette préservation. Les atolls de la partie centrale de l'archipel ont été toutefois plus affectés par le blanchiment que les autres sites de l'archipel. Y-a-t'il une origine anthropique à rechercher dans cette intensification du phénomène ? Pour ce qui est du reste de l'archipel, il a été estimé que la couverture corallienne avait été réduite de 20 % par rapport à la période précédant 1998.

Tableau 9 : Physionomie des pentes récifales durant les campagnes *INQUA* de 2000-2001

Année	Atoll	Ile	Profondeur	Phynionomie
2000	Baa	Aidhoo	10-15 m	90 % morts
2000	Baa	Goidhoo	10-18 m	50 % morts
2000	Male' nord	Galhu Falhu	25 m	80-90 % morts
2000	Male' nord	Kiki reef		Début de croissance corallienne
2001	Baa	Dhigu Thila	20 m	80 % morts
2001	Raa	Kandhulhudhoo	20-25 m	90 % morts
2001	Raa	Maamunagoo	6 m	80-90 % morts
2001	Seenu	Gan		50 % morts - présence de nombreuses repousses
2001	Seenu	Kandu Huraa	4-30 m	Forte couverture corallienne vivante
2001	Seenu	Aboohuraa	20-40 m	100 % vivants
2001	Seenu	Nord-ouest du lagon	0-20 m	100 % vivants
2001	Seenu	Nord-ouest du lagon	20 m	Début de croissance corallienne

D'après les observations que nous avons pu faire durant nos plongées, un nombre important de familles a été temporairement éradiqué. Il s'agit des *Acroporidae*, *Pocilloporidae*, *Poritidae* (à l'exception des *Porites* et des *Goniopora*) et des *Faviidae* (à l'exception de *Diplohelix heliopora*). Certaines familles ont été moins touchées comme, par exemple, les *Agariciidae*, *Mussidae*, *Dendrophylliidae*, *Fungiidae*.

Phénomène considéré comme isolé dans le Pacifique, le blanchiment est désormais observable dans tous les océans du globe avec une intensité, une fréquence et une durée différentes selon les sites considérés. Assez peu étudié, car il s'agissait d'un événement rare et localisé, il n'a attiré l'intérêt des scientifiques qu'au cours des années 1980. Il a été décrit pour la première fois par Glynn en 1984 (Brown B.E., 1997), bien que Mayer (*in* Pomerance R., 1999) l'ait identifié comme un événement naturel il y a plus de 80 ans.

Il s'agit d'une réaction naturelle des coraux face à un stress externe, naturel ou anthropique, se traduisant par l'expulsion des zooxanthelles *in situ* (en cas d'expulsion massive sur un platier peu profond, l'eau prend une coloration verdâtre très nette au dessus des coraux blanchis). Les coraux apparaissent blancs et laissent percevoir leur squelette à travers le tissu transparent. Privés de leurs algues qui leur apportent leur couleur, leur procurent leur nutrition et leur permettent d'édifier leur squelette calcaire, les coraux sont affaiblis. Leur blanchiment peut être considéré comme le premier stade d'alerte écologique. Ils peuvent survivre à un stress limité dans le temps, mais, si ce stress se prolonge, ils meurent (Wilkinson C.R. *et al.*, 1999) d'autant plus vite que d'autres événements physiques (une baisse de la salinité du fait d'une augmentation des précipitations) ou biologiques se surajoutent.

Durant l'ENSO de 1997-1998, qui est considéré comme l'événement du siècle, le blanchiment a touché plus de soixante pays dans les océans Pacifique et Indien, les Caraïbes, la mer Rouge et le golfe Persique ; seul, le Pacifique central semble avoir été préservé, ce que vérifie le cas des Tuvalu. Les images satellitaires de la NOAA ont permis de retracer son cheminement. En janvier 1997, il est proche de l'équateur, où les températures des eaux de surface sont de 4 °C supérieures à la normale. Or, nous savons désormais qu'une élévation même minime de la température de l'océan, entre 1 et 2 °C, sur plusieurs semaines, est suffisante pour provoquer une phase de blanchiment importante (Spalding M.D. *et al.*, 2003). En juillet 1997, on le localise dans le Pacifique oriental et, en janvier 1998, on l'observe à la fois dans le Pacifique, mais également dans l'océan Indien où il s'intensifie à partir d'avril de la même année. Les premiers signes de blanchiment ont été signalés dans l'archipel des Maldives dès la mi-avril et les atteintes ont été sévères de fin avril à la mi-mai. Il peut être surprenant qu'une période aussi courte puisse avoir autant d'impact sur des colonies coralliennes, mais l'année 1998 fut globalement chaude avec un mois et demi de températures très élevées. Les coraux ont été mis brusquement en condition de stress sans pour pouvoir reprendre leur croissance de façon normale. Il est d'ailleurs important de souligner que les coraux avaient été soumis à un stress majeur en 1994. Peut-être qu'une fois fragilisés par cet événement, ils ont été plus vulnérables, s'avérant incapables de s'adapter à de telles modifications de leur environnement. Si les événements précédents, comme celui de 1994, marquaient fortement les colonies coralliennes jusqu'à 15 m de profondeur, la phase de blanchiment de 1998 a eu des répercussions jusqu'à 50 m (Wilkinson C.R. *et al.*, 1999). Suivant les sites, le blanchiment a pu être ponctuel, touchant quelques patates coralliennes, ou régional comme dans certains archipels où il concernait plus de 80 % des récifs coralliens.

Les coraux de faible profondeur (jusqu'à 15 m environ), comme dans la partie centrale de l'archipel des Maldives, du Kenya, du Sri Lanka, des Laccadives, de la Tanzanie..., ont été détruits à plus de 90 %, tandis que, dans les autres récifs de l'océan Indien, la mortalité a atteint 40 - 50 % et cela jusqu'à des profondeurs excédant 20 m (Wilkinson C.R. *et al.*, 1999). Aux Maldives, les coraux des eaux peu profondes ont donc été décimés (90 et 95 % de mortalité), alors qu'entre 10 et 30 mètres de profondeur, 55 % d'entre eux ont survécu. Le blanchiment a touché certaines espèces jusqu'à 50 m

de profondeur, particulièrement les espèces à croissance rapide comme les *Montipora*, *Echinopora* et les *Acropora*. Les coraux massifs comme les *Porites* ont également souffert, mais ont pu reprendre leur croissance un à deux mois après l'optimum du phénomène (Wilkinson C.R. *et al.*, 1999). Nous en avons pour preuve les expérimentations menées par des chercheurs (Edwards A. *et al.*, 2001) sur des récifs artificiels. En effet, après observations, ils ont pu déterminer qu'au moins 98 % des coraux branchus, implantés en 1990 sur ces récifs artificiels, sont morts, tandis que les coraux massifs ont bien résisté.

A l'heure de la repousse, on se rend compte (Loch K. *et al.*, 2002) que les zones fortement affectées par le blanchiment n'ont plus la même composition faunistique. Alors que les *Acropora* étaient les espèces dominantes, elles ont presque totalement disparu de l'archipel, même si, actuellement, les repousses sont cependant nombreuses. A l'inverse, les *Porites* ont été assez bien préservés. Ce phénomène a également été observé dans l'île de Belize, où l'on a pu retrouver sur le récif un important épisode de blanchiment datant des années 1980 (Loch K. *et al.*, 2002).

Les surveillances effectuées sur certains sites des Maldives (Marine Research Centre, 1999), avant et durant le blanchiment de 1998, ont indiqué que la couverture corallienne était « vingt fois » plus importante avant cette date. Sa vitesse de réimplantation semble se faire de façon plus lente. En effet, dix mois après l'événement, 67 % des *Acropora* et *Pocillopora* et 33 % des colonies massives étaient régénérées, alors qu'en 1994, les pourcentages atteignaient respectivement 94 % et 6 % (Edwards A. *et al.*, 2001) ; la faiblesse du second chiffre s'explique par une perte moins importante des coraux massifs en 1994. D'après H. Maniku, les « 2 000 îles des Maldives ont été touchées par le phénomène ». D'ailleurs, l'observation des lagons des îles de Kuhudhuffushi, Nolvivaramfaru, Hanimadhoo, Finey, Hodaafushi, Hirimaradhoo, menée par le *Marine Research Center*, a montré que près de 100 % des espèces récifales sont mortes durant cette phase de blanchiment et cela jusqu'à 10 m de profondeur (H. Maniku, communication personnelle).

D'après nos propres observations, menées lors de plongées effectuées dans les atolls centraux, les mortalités coralliennes avoisinent les 50 % dans les parties profondes des pentes récifales et atteignent plus de 90 % sur les platiers récifaux ou dans les zones de petits fonds. Toutefois, durant la mission de 2001, nous avons pu observer le redéploiement de jeunes colonies, même si cette repousse est moins florissante que la précédente et nécessitera plusieurs décennies avant qu'une diversité corallienne comparable à celle d'avant 1998 soit acquise.

Tableau 10 : Exemples de couverture corallienne avant et après l'événement de 1998

Localisation	Couverture corallienne avant 1998 (en %)	Couverture corallienne après 1998 (en %)	Mortalité (en %)	Sources
Malé nord	100	45	93	Clark
Bodhufinolhu (Gaaf Alif)	36	16	56	Sluka
Malé sud	60	11	82	McClanahan

Mulaku	60	13	78	McClanahan
Felidhoo (Vaavu)	60	6	90	McClanahan
Ihuru (Kaafu)	indéterminé	indéterminé	95-99	Goreau - Hilbertz

(Goreau T.J. *et al.*, 2000)

La comparaison entre la température moyenne de l'océan établie à partir des données collectées entre 1950 et 1999, montrant une augmentation en surface de 0,16 °C par décennie (Edwards A. *et al.*, 2001), et les relevés effectués au cours de cette année 1998, a révélé dans l'océan Indien des chiffres supérieurs à la normale de 2 à 3 °C et ponctuellement de 4 à 6 °C (Wilkinson C.R. *et al.*, 1999). Aux Maldives, les eaux océaniques sont passées en quelques semaines de 29 °C à 32 °C (Clark S. *et al.*, 1999). D'après notre collègue William Allison⁴⁸, la température de l'eau au niveau des platiers est montée à la mi-avril jusqu'à 33 °C et jusqu'à 31 °C à 3 m de profondeur. Cette hausse de la température a coïncidé avec une période de vent faible (Clark S. *et al.*, 1999).

Le climat régional joue donc un rôle important dans les variations de température de l'eau de mer durant les différentes saisons climatiques. Durant la saison dite « de calme », de janvier à avril, la température de l'eau de surface va augmenter pour atteindre au maximum 30 °C (Edwards A. *et al.*, 2001), tandis que, de fin mai à novembre-décembre, la température de surface va légèrement diminuer du fait des pluies plus abondantes et d'un brassage plus important des eaux provoqué par les vents de mousson. Comme nous l'avons noté précédemment, la température de l'eau de surface est montée de façon excessive durant l'épisode de 1998 puisqu'elle était de 2,1 °C supérieure à la normale (Edwards A. *et al.*, 2001). De leur côté, les analyses de la NOAA montrent une élévation de la température de surface, entre 2 - 3 °C supérieure à la moyenne, avec un pic entre avril et mai, et suggèrent une phase de blanchiment dès la mi-avril. Cette observation a été confortée par les plongées de William Allison qui vont révéler les premiers signes de blanchiment dans les atolls de la partie centrale de l'archipel dès la mi-avril. Début mai, la température de l'eau, au plus proche de la barrière récifale, est encore à 32,5 °C. A la mi-mai, la couche de température de 32 °C se retrouve jusqu'à 15 m de profondeur dans l'atoll de Kaafu et 31 °C jusqu'à 30 m de profondeur pour les atolls de la partie centrale. A la fin mai, la température diminue jusqu'à 30 - 30,5 °C au niveau des platiers récifaux et 29,5 °C sur les façades océaniques des atolls. D'après T.J. Goreau *et al.* (2000), certains atolls ont cependant été épargnés par le blanchiment grâce aux upwellings qui peuvent être importants dans l'archipel des Maldives.

D'une manière générale, l'année 1998 a été l'année la plus chaude par rapport à la moyenne des températures de surface calculée sur une période de 50 ans.

Si aux observations des platiers maldiviens par photographies aériennes, on couple des plongées sous-marines, on constate qu'il existe de grosses colonies coralliennes, de type *Porites*, *Pavona*, *Favites*, témoignant d'un passé climatique et océanique sans dérèglement. De plus, l'uniformité dans la taille

⁴⁸ Communication personnelle

de certaines espèces suggère des phénomènes assez réguliers avec une colonisation collective de l'édifice par une seule et même espèce (cf. Figure 138). Ces observations ont été faites sur plusieurs pentes externes d'atolls. En effet, lors d'une plongée⁴⁹, on a pu noter la présence d'éboulis de corail mort plus anciens que ceux issus du dernier phénomène El Niño de 1998. Ceci confirme l'antériorité du phénomène ainsi que la faculté qu'ont les récifs de se reconstituer malgré un épisode dramatique pour leurs structures.

Des hypothèses ont été avancées écartant une mutation des coraux pour s'adapter à de nouvelles conditions écologiques (Hoegh-Guldberg O., 1999). Pourtant ils résistent aux rayons ultraviolets (Dunlap W.C. et Shick J.M., 1998 in Gattuso J.-P., et Buddemeier R.W., 2002) et, certaines espèces comme les *Favia* et les *Agaricia* ont été identifiées dans des vasques dont la température atteint les 40 °C. La non-mutation des coraux sus-évoquée, semble également contredite par la réaction de certaines espèces madréporiques chez lesquelles on a pu observer des résistances au blanchiment voire des retours de vitalité, phénomènes indiquant que certaines d'entre elles possèdent des capacités et des stratégies d'adaptation aux nouvelles contraintes (Buddemeier R.W. et Fautin D.G., 1993 in Gattuso J.-P., et Buddemeier R.W., 2002 ; Vanney J.-R., 2002). Cette adaptation pourrait s'opérer par l'augmentation du seuil de tolérance vis-à-vis de la température et une mutation des espèces coralliennes privilégiant la prolifération des plus résistantes. Une telle évolution impliquerait une adaptation sur le long terme et une modification de la physionomie des récifs coralliens mondiaux.

Si certains auteurs (Hoegh-Guldberg O., 1999) considèrent que le blanchiment est la conséquence de changements climatiques locaux et/ou globaux, les théories actuelles ne sont pas aussi catégoriques (Clark S. *et al.*, 1999 ; Wilkinson C.R. *et al.*, 1999). En effet, il n'y a pas de raisons évidentes qui indiquent que le réchauffement des eaux de surface, qui intervient durant les phases El Niño, correspond à des périodes importantes de blanchiment. Même si les principales phases, qui se sont déroulées durant les vingt dernières années, se caractérisent par une élévation de température de l'océan correspondant à + 1 °C, notamment durant le paroxysme estival, il est également apparu que les événements de blanchiment ont pu se produire tout au long de l'année dans la plupart des océans tropicaux au cours des derniers 30-50 ans (Hoegh-Guldberg O., 1999 ; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001).

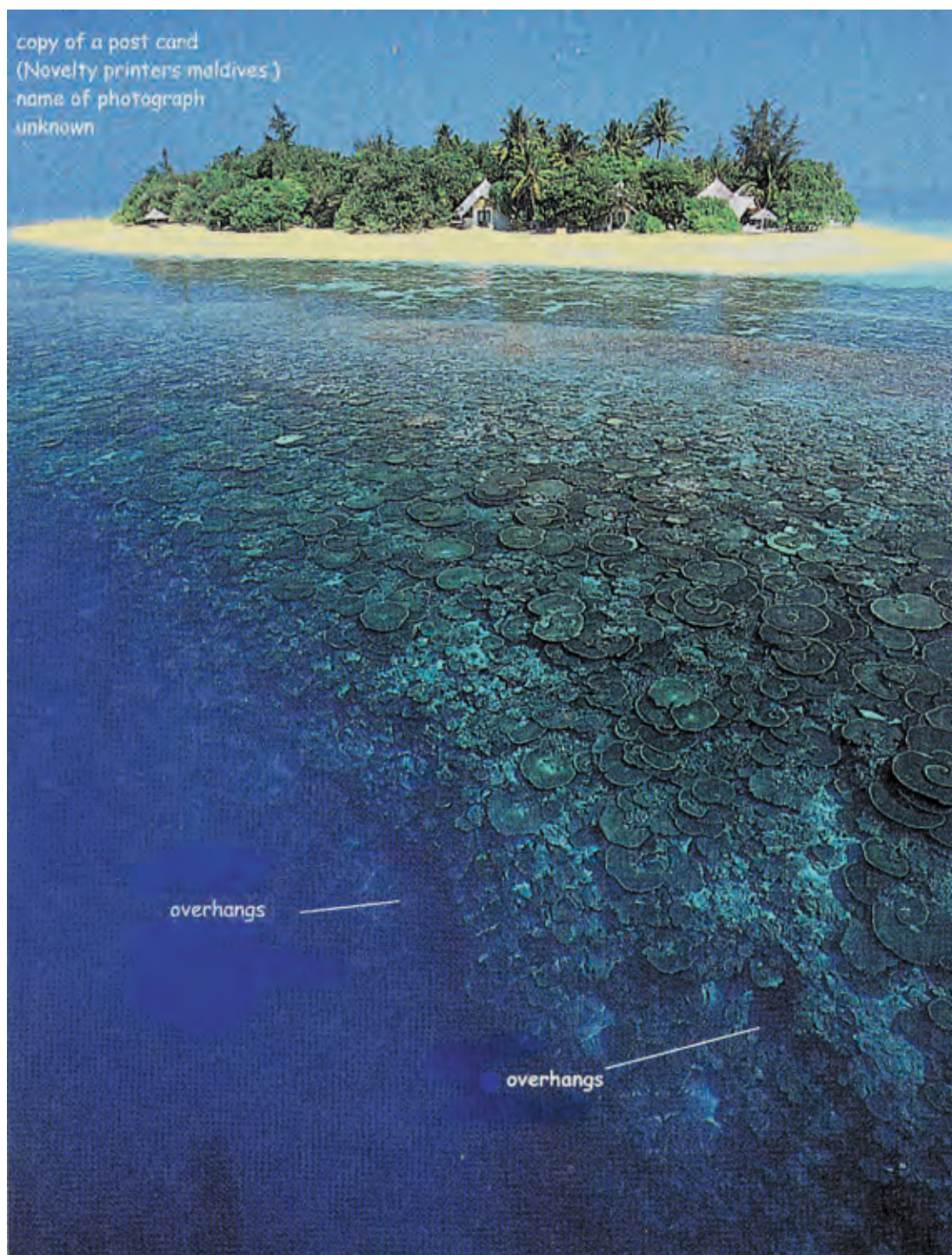
D'après ReefCheck⁵⁰, après l'événement de 1998, la surface mondiale des océans colonisée par les coraux a diminué de 10 % par rapport à 1997.

D'après Hoegh-Guldberg (1999 in I.P.C.C., 2001), "*the incidence of bleaching will rise rapidly, with the rate of increase highest in the Caribbean and slowest in the Central Pacific region*". Ainsi,

⁴⁹ Atoll de Raa : 5°31'66"N – 72°55'92"E

⁵⁰ www.reefcheck.org

Figure 138 : Uniformité dans les éléments coralliens d'une pente externe aux Maldives



Sur cette carte postale retouchée, nous avons pu mettre en évidence deux structures sous-marines sur la pente externe du récif, au sein de la structure pré-holocène, délimitée par les colonies coralliennes vivantes. Les grottes ont pu être dégagées par érosion. L'uniformité dans la taille et la monospécificité des espèces coralliennes présentes nous laissent envisager une reconstruction récente après un phénomène climatique marquant, antérieure à celui de 1998.

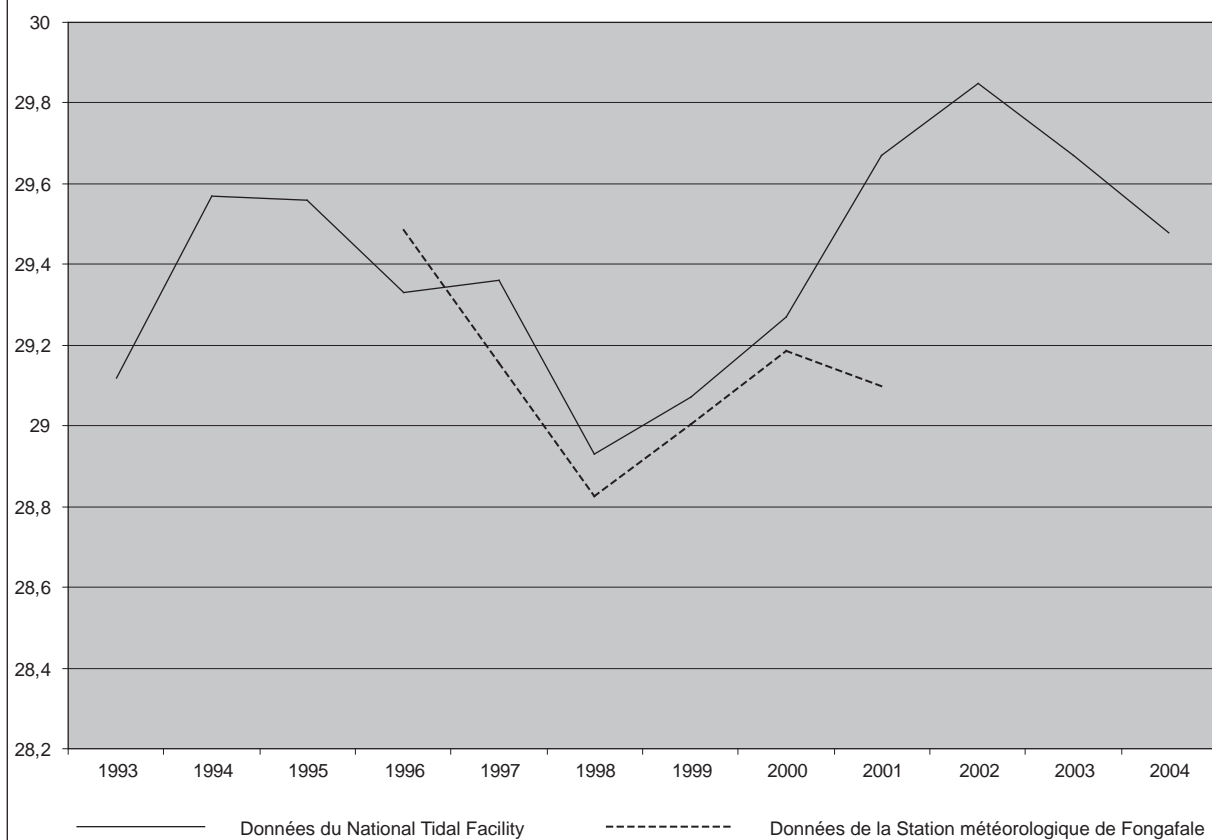
l'archipel des Tuvalu a été peu touché par l'événement majeur de 1998, puisque « seules quelques espèces coralliennes ont été très légèrement blanchies »⁵¹. Par contre, l'atoll de Funafuti a été plus fortement marqué par une phase de blanchiment en mai 2002 (Samasoni S., 2002), qui n'a pas été associée aux conditions de type El Niño. Cet épisode a dû très certainement débuter fin-mars début avril. Les températures de surface ont atteint 30,5 °C avec des pics de température à 32 °C, d'après les données fournies par le site internet *reefbase*⁵². Les données enregistrées par le marégraphe de Fongafale (cf. Figure 139) confirment une hausse de température des eaux lagunaires pour l'année 2002. Sur les douze années enregistrées, elle est l'année la plus chaude avec une moyenne de 29,9 °C. Le blanchiment a surtout touché les espèces situées sur la bordure récifale sur les premiers mètres de la pente externe, ainsi que celles localisées sur le plancher lagunaire. D'après les différentes surveillances effectuées, les *Acropora* ont été les plus affectés par cette phase de blanchiment puisque 70 % ont été blanchis, alors que les *Pocillopora* ont été endommagés à 20 % et les autres espèces (*Faviia*, *Agaricia*) à moins de 10 %.

Un épisode chaud de type El Niño peut causer des réactions en chaîne au sein d'un atoll. Le corail édifiant la barrière récifale qui l'entoure peut être tellement fragilisé par l'augmentation de température qu'il peut mourir ou se briser. Aucune résistance ne s'opposant alors à l'attaque des vagues durant les saisons à fortes houles, ces dernières vont atteindre la côte sans être ralenties et provoquer une érosion locale ou générale, même s'il s'opère un cuirassement rapide des coraux morts nouvellement détruits par les algues calcaires susceptible de limiter partiellement l'érosion. Cette érosion sera-t-elle alors considérée comme une érosion due à l'élévation global du niveau de la mer ou à un phénomène localisé et ponctuel ?

⁵¹ Entretien avec Semese Alefaiao (2001) – Ministry of Natural Resources and Environment

⁵² www.reefbase.org

Figure 139 : Comparaison des courbes de température des eaux lagonaires dans l'atoll de Funafuti



Chapitre 6 - Les comportements environnementaux dans la perspective des changements globaux

Les analyses climatiques et marégraphiques ne permettent pas d'avoir un recul nécessaire pour estimer si la perspective d'un changement global se vérifie. Certes, nous avons pu mettre en évidence des changements à l'échelle de nos archipels mais rien de significatif. Il paraît toutefois nécessaire de s'interroger sur les conséquences d'une éventuelle élévation du niveau de la mer et/ou d'une modification climatique pour évaluer le risque qui en découle pour les populations des îles basses. En dépit des incertitudes, ce chapitre se veut prévisionnel en envisageant les stratégies de défense pour l'avenir.

6.1. Les scénarii envisagés

« Nous vivons dans la crainte constante des effets du changement climatique. La menace est sérieuse et s'apparente à une forme insidieuse de terrorisme contre nous » (Discours du Premier Ministre de Tuvalu à l'ONU, Septembre 2003).

6.1.1. Les prévisions climatiques

Il peut être stupéfiant de lire que, dans un article paru en 1896, un auteur, Arrhenius (*in* Bard E., 2004) avait prévu une augmentation de la température moyenne de la Terre, comme conséquence de l'utilisation industrielle des combustibles fossiles, comparable à celle estimée par l'IPCC en 2001, soit environ 5 à 6 °C. Les modèles mathématiques appliqués aux variations du climat (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001) à l'échelle des océans et des mers envisagent une augmentation de température de 2 °C pour l'Atlantique, le Pacifique et les Caraïbes et de 2,8 °C pour l'océan Indien et la Méditerranée d'ici à 2050, puis de 3,1 °C pour l'Atlantique et les Caraïbes, 3 °C pour le Pacifique, 3,2 °C pour l'Indien et enfin 4,3 °C pour la Méditerranée d'ici à 2080. R.W. Buddemeier et J.-P. Gattuso (2000) considèrent que les effets de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère vont avoir comme conséquence, d'ici à la fin du XXI^e siècle, d'augmenter la température moyenne de l'atmosphère de 2 à 3 °C à l'échelle planétaire, comme cela s'est produit durant l'Optimum Climatique Glaciaire (Leroux M., 2000) quoique, pour d'autres encore, l'augmentation de la température oscillerait entre 1,5 ° et 6 °C d'ici à 2100 (Allen L., 2004).

Certaines études récentes (Holland *in* IPCC, 2001) ont indiqué une possible augmentation de la fréquence des cyclones entre 10 et 20 %, alors que d'autres (Jones *in* IPCC, 2001) envisagent une légère décroissance de la cyclogenèse.

6.1.2. Les prévisions eustatiques

Il est estimé que la remontée ne se fera pas de façon uniforme à l'échelle de l'océan Mondial. Les spécialistes envisagent une remontée plus importante dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud avec toutefois un impact ciblé sur les régions instables comme les deltas, les plaines littorales, les îles basses...

Les prévisions d'un « Déluge » ont été très tôt envisagées. A la fin de la décennie 1980, il était estimé qu'une élévation du niveau de la mer de + 60 cm autour des Maldives allait submerger les îles coralliennes et contraindre au déplacement de plus de 177 000 habitants (Falk et Brownlow, 1989 *in* Hopley D., 1994). Depuis, la remontée du niveau de la mer est estimée entre 10 et 90 cm pour le XXI^e siècle (Gattuso J.-P. et Buddemeier R. W., 2002). Pour les décennies 2030-2040, la mer devrait monter de 0,10 m (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001), alors que les instances scientifiques internationales ont retenu une hausse moyenne séculaire de 0,50 m qui ait été retenue.

D'ici à 2100 (IPCC, 2001), la température de la mer pourrait augmenter de 1 à 3,5 °C avec comme conséquence une élévation de son niveau comprise entre 15 et 95 cm pour une valeur centrale de 47 cm. Plus précisément, il est estimé que les minimales et les maximales se situeraient respectivement entre 15-20 cm et 80-95 cm.

Certains organismes (WMO *in* Khan T.M.A. et al., 2002) estiment que la capitale des Maldives serait inondée à plus de 85 % en cas d'élévation d'un mètre du niveau de la mer d'ici à 2100.

Tableau 11 : Exemples de modifications climato-océaniques d'ici à 2100

Température	Niveau marin	Sources
1,5° - 4,5 °C	20 – 140 cm	UNEP, 1986
2° C (+/- 0,15 °C)	0,36 m (+/- 0,3 m)	IPCC, 1990
	14-80 cm	R. Paskoff, 2000
1,0 – 3,5 °C	15-95 cm	IPCC, 2001

Il existe de nombreuses incertitudes sur l'évolution des climats au travers de leurs mécanismes et de leurs interactions, sur les données d'observations, sur la fiabilité des modèles, sur les scénarii économiques pour l'avenir de la planète. Les modèles prévoient tous une augmentation de la température mais les simulations donnent encore des valeurs très incertaines, entre 1,4 et 6°C⁵³.

Ces modèles prennent en compte l'atmosphère, l'océan, la végétation, les surfaces continentales et les glaces de mer, bien qu'ils aient tous des constantes de temps différentes variant du siècle à l'année.

⁵³ <http://www.lsce.cnrs-gif.fr/>

Toutefois comme le fait remarquer un auteur (Imperiali F., 2004), comment peut-on estimer sérieusement les variations climatiques passées et futures sur près de trois cents ans, de 1850 à 2100, comme le demande l'IPCC avec le peu de recul dont nous disposons.

Toutes ces prévisions montrent à quel point le climat est dépendant des modèles. Toutefois comment prévoir objectivement une évolution du système climatique compte tenu de son caractère non linéaire ? En effet, en cas de forçage, les systèmes non linéaires comme les fluctuations rapides de la circulation dans les bassins océaniques, les modifications des écosystèmes terrestres... peuvent avoir des comportements inattendus.

C'est pour toutes ces raisons que nous sommes d'accord avec M. Leroux (Leroux M., 2000) qui considère que « ces modèles n'ont pas forcément tort mais ils ont un inconvénient majeur, de ne pas prendre assez de recul par rapport aux données dont ils disposent, données souvent assez récentes, et dont ils tirent une évolution ». Malheureusement, cette modélisation est considérée aux yeux des politiques comme la seule approche scientifique valable pour prévoir l'évolution des systèmes insulaires, en ignorant les observations morphologiques de terrain et en niant les impacts anthropiques.

6.2. Atolls : les enseignements tirés du passé

C'est le comportement du récif qui va être déterminant en cas d'élévation avérée du niveau de la mer. Pour cela, la production sédimentaire du récif doit, dans des conditions optimales, contrebalancer la subsidence tectonique et/ou l'élévation du niveau de la mer.

Il faut être toutefois optimiste car, comme le souligne L.F. Montaggioni (2000b), « les constructions récifales de type *hexacoralliaires* ont toujours su s'adapter aux nouvelles conditions environnementales, comme les changements climatiques ou les événements eustatiques de grande ampleur, en développant des innovations évolutives ».

Cet optimisme peut être renforcé si l'on se réfère au modèle de prédiction numérique établi par Mitrovica J.X. et Milne G.A. (2002). Selon ces auteurs, les archipels étudiés sont compris dans une région où le niveau de la mer baisse suivant des vitesses comprises entre 0,1 à 0,4 mm/an⁻¹ pour l'océan Indien et 0,1 à 0,5 mm/an⁻¹ pour l'océan Pacifique. Ce modèle prend en compte une déglaciation totalement stoppée vers 5 000 BP et reflète donc les ajustements actuels du niveau de la mer durant une période où il n'y a eu aucun apport d'eau de fonte.

6.2.1. La réponse des récifs

Dans des conditions optimales, l'élévation du niveau de la mer peut avoir comme conséquence soit une recolonisation totale ou partielle des zones émergées avec un retour aux conditions antérieures d'un atoll, soit une submersion si la recolonisation ne se produit pas.

Ainsi, le récif doit adapter son taux de croissance à la remontée et, par conséquent, la suivre, la rattraper ou y renoncer (cf. Figure 140). Trois *scénarii* ont été mis en avant d'après les recherches menées sur des récifs lors de la remontée postglaciaire (Neumann A.C. et Macintyre A., 1985). On parle alors de stratégies basées sur la relation entre le taux de croissance instantané du récif et la remontée du niveau marin.

Le premier cas concerne le type de récif « *keep up* » (cf. Figure 141 - annexe), qui est capable de s'adapter aux nouvelles conditions du milieu pour croître en même temps que le niveau de la mer et se maintenir à ce niveau. Pour permettre au récif de talonner le niveau de la mer, il faut que ses parties bioconstruites (la pente externe et/ou la bordure récifale) soient en mesure d'assurer un bon développement corallien. L'extension des organismes récifaux est alors verticale, puis latérale, notamment durant la phase de décélération. Si le récif n'est pas capable de suivre la remontée du niveau de la mer, deux perspectives sont envisagées :

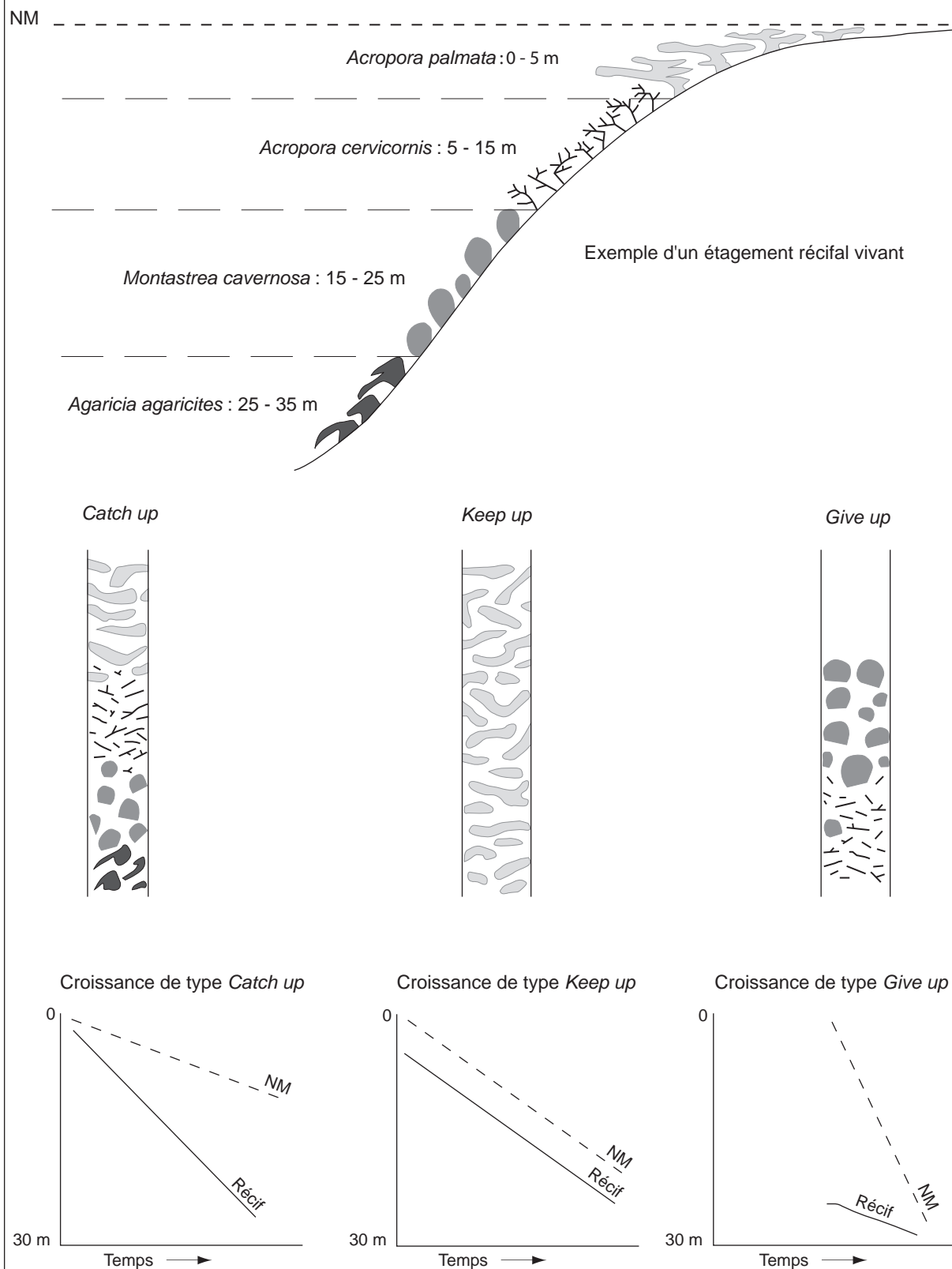
- dans le cas des récifs de type « *catch up* », la croissance verticale des organismes récifaux permet de rattraper le niveau de surface une fois que ce dernier est stable. Ces récifs ont la particularité de commencer leur croissance comme les récifs de type « *keep up* » mais sont incapables de suivre l'évolution, lorsque l'accrétion s'accélère, car ils demeurent un temps en profondeur. Lorsqu'ils arrivent à combler leur décalage avec le niveau marin de surface, ils développent des faciès latéraux et deviennent sénescents.

- dans le troisième type de récif, communément appelé « *give up* », la submersion de l'édifice corallien est inévitable. La croissance récifale est incapable de compenser l'élévation du niveau de la mer. Lorsque le décalage entre les deux est trop important, les structures coralliennes résiduelles ainsi submergées s'appauvrissent, déclinent et meurent.

Un quatrième comportement peut être envisagé à partir des travaux que nous avons menés dans l'archipel des Maldives. Il s'agit de la construction de récifs à partir d'un modèle sous-jacent lui-même issu de variations eustatiques positives antérieures. Dans ce cas, les organismes récifaux colonisent les morphologies héritées en suivant l'élévation du niveau de la mer.

Les vitesses de croissance récifale calculées à partir d'observations faites sur les derniers 18 000 ans montrent une évolution entre 0,8 et 20 mm/an. Sur trois îles de l'océan Indien, les réponses face à l'élévation postglaciaire ont été différentes. Si, le récif de l'île de Mayotte a suivi de façon continue l'élévation verticale de la transgression marine, la réponse des récifs de la Réunion et de l'île Maurice a été plutôt de type « *catch up* » avec une vitesse d'accrétion se situant entre 0,9 et 7 mm/an, pour une vitesse de subsidence estimée à 0,04 mm/an. De nombreux récifs ont répondu positivement à la

Figure 140 : Comportement de l'appareil récifal durant la remontée postglaciaire du niveau de la mer



d'après Scoffin, 1986

remontée postglaciaire en adoptant des stratégies de croissance différentes qui se sont traduites par l'édification des récifs actuels, d'autres rares ayant été ennoyés (Adey W.H. *et al.*, 1977 ; Blanchon P. et Shaw J., 1995).

Les observations menées sur une cohorte récifale lors de la transgression holocène montrent qu'un récif peut suivre la remontée du niveau de la mer si cette dernière est inférieure ou égale à 3 mm/an. Toutefois, cette vitesse de croissance des récifs coralliens dépend, d'une part de la vitesse de production des *Halimeda* qui apporte la cohérence à l'édifice en comblant les vides par l'apport de matériaux bioclastiques, d'autre part de la réaction des différentes parties du complexe récifal qui ne croissent pas à la même vitesse. Ainsi, d'après des travaux réalisés sur la grande barrière de corail, les crêtes algales et les zones algo-coralliennes des bordures récifales ou des platiers océaniques construits peuvent se développer jusqu'à quinze fois plus vite que les fonds sédimentaires adjacents (Bessat F., 1997), respectivement 2,8 – 3,1 mm/an⁻¹ contre 0,2 – 0,3 mm/an⁻¹.

D'après le comportement postglaciaire des récifs coralliens, il semble que l'élévation du niveau de la mer ne soit pas le facteur déterminant du devenir, à moyen ou à long terme, des écosystèmes récifaux (Montaggioni L.F., 2000). L'avenir des écosystèmes coralliens, dans une perspective de changement du niveau relatif de la mer, dépend de la capacité que vont avoir les colonies coralliennes à se développer dans des conditions écologiques différentes en température, en sédimentation, en hydrothermalisme, en luminosité (Bessat F., 1997). Ces facteurs, dont l'impact est immédiat, peuvent affecter la croissance et la productivité de certaines espèces coralliennes qui seront primordiales dans le comportement futur des récifs.

6.2.2. La réponse des colonies coralliennes

D'après plusieurs auteurs, la croissance des colonies coralliennes a été estimée aux alentours de 2,5 cm/an, dans des conditions favorables et pendant une partie de leur vie. Cependant, cette moyenne ne traduit pas la croissance générale d'un récif qui se situe entre croissance et érosion (Goreau T.F., 1961), même si elle peut, dans des conditions optimales, montrer le bon fonctionnement d'un récif et permettre de prévoir son comportement en cas d'élévation du niveau de la mer.

Certains (Kuenen *in* Guilcher, 1953) considèrent l'accroissement d'un récif très inférieur à 10 mm/an, alors que pour d'autres (Hopley D., 1986) la croissance corallienne se situe entre 4 et 20 mm/an, avec une moyenne entre 10 et 12 mm/an pour les espèces massives, et à environ 100 mm/an pour les espèces branchues comme les *Acropora* (Buddemeier et Kinzie, 1976 *in* Hopley D., 1986).

Les valeurs actuelles de croissance restent assez proches des observations effectuées au cours des cinquante dernières années. Ainsi, dans l'archipel des Kiribati, depuis le Dernier Maximum

Glaciaire, la croissance corallienne a été estimée entre 5 – 8 mm/an tandis qu'aux Maldives, comme nous l'avons vu précédemment, elle a été estimée entre 7 – 8 mm/an (Ciarapica G. et Passeri L., 1993).

Suivant les espèces, les vitesses de croissance sont toutefois différentes. Ainsi, la croissance des *Porites* a été estimée entre 5 – 25 mm/an⁻¹ dans l'archipel des Kiribati (Woodroffe C.D. et Mclean R., 1990) alors qu'aux Maldives (Maniku in Marine Research Centre, 1999), elle se situe entre 40 et 60 mm/an pour les *Porites* localisés dans des eaux calmes lagonaires. Le développement des colonies coralliennes peut être encore plus rapide dans des zones oxygénées où l'on estime à 200 mm/an la croissance d'*Acropora*, avec un gain de 15 cm de diamètre en quatre ans pour les *Porites*. Généralement, les vitesses de croissance, même pour les *Acropora* à développement rapide, se situent autour de 10 à 20 mm/an comme le prouvent les travaux de F. Bessat (1997), alors que les vitesses de croissance enregistrées en Polynésie française, d'environ 15 mm/an, étaient déjà largement compatibles avec une transgression marine.

Pour d'autres (Watanabe T. *et al.*, 2003), la croissance corallienne actuelle se situe dans une fourchette comprise entre 2 et 6 mm/an avec une croissance corallienne maximale estimée à 12 mm par an (Arlington V.A., 2000).

La production moyenne en carbonate de calcium pour l'ensemble d'un récif pourrait être de l'ordre de 7kg CaCO₃/m²/an pour une porosité de 50 % et une élévation du bâti de 7 mm/an (Stoddart, 1990). En effet, selon la localisation sur le récif, on obtient des valeurs différentes, de l'ordre de 0,8 (bord interne), 4 (platier) et 10 (bord externe) kg CaCO₃/m²/an respectivement pour une accrétion verticale de 0,6, 3 et 7 mm/an (Buddemeier et Smith, 1988).

La configuration géomorphologique dépend pour une large part de la capacité des colonies coralliennes massives à se développer dans des conditions hydro-climatiques optimales (Bessat F., 1997).

Les études menées récemment sur la relation entre la santé des coraux, considérés comme des écosystèmes éminemment fragiles, et les perturbations extérieures, montrent des résultats encourageants, notamment sur les perturbations anthropiques de type pollution (Bessat F., 1997). En effet, les édifices coralliens montrent une certaine robustesse si l'on considère qu'ils sont en place depuis plus de 250 millions d'années et qu'ils ont survécu à des événements climatiques majeurs. Il ne faut peut-être pas tant craindre les modifications naturelles que les perturbations anthropiques. Comme les récifs bordent dans leur majorité des pays en développement, dans lesquels la pression démographique et les aménagements font peser des menaces croissantes pour ces écosystèmes, nous pouvons craindre pour leur survie.

6.2.3. Le comportement insulaire

Si les colonies coralliennes, et implicitement le récif corallien, peuvent suivre l'élévation du niveau de la mer, qu'en est-il des systèmes insulaires ? On se réfère alors à la loi de Bruun élaborée d'après les modèles d'évolution morpho-sédimentaires des plages tempérées. Ainsi, nous pouvons lire qu'une « élévation de 30 centimètres suffirait à provoquer un recul du littoral de 29 mètres en moyenne » (Allen L., 2004), ou encore qu'une élévation de 1 m serait responsable d'une érosion côtière de 50 à 200 m (Titus J., 1989). De récentes estimations indiquent que, pour une élévation d'un mètre du niveau de la mer, 10,3 km² de terres seraient érodées sur l'île de Tongatapu. D'après les calculs effectués suivant cette même loi, l'atoll de Majuro perdrait 8,6 % de ses terres pour un mètre d'élévation.

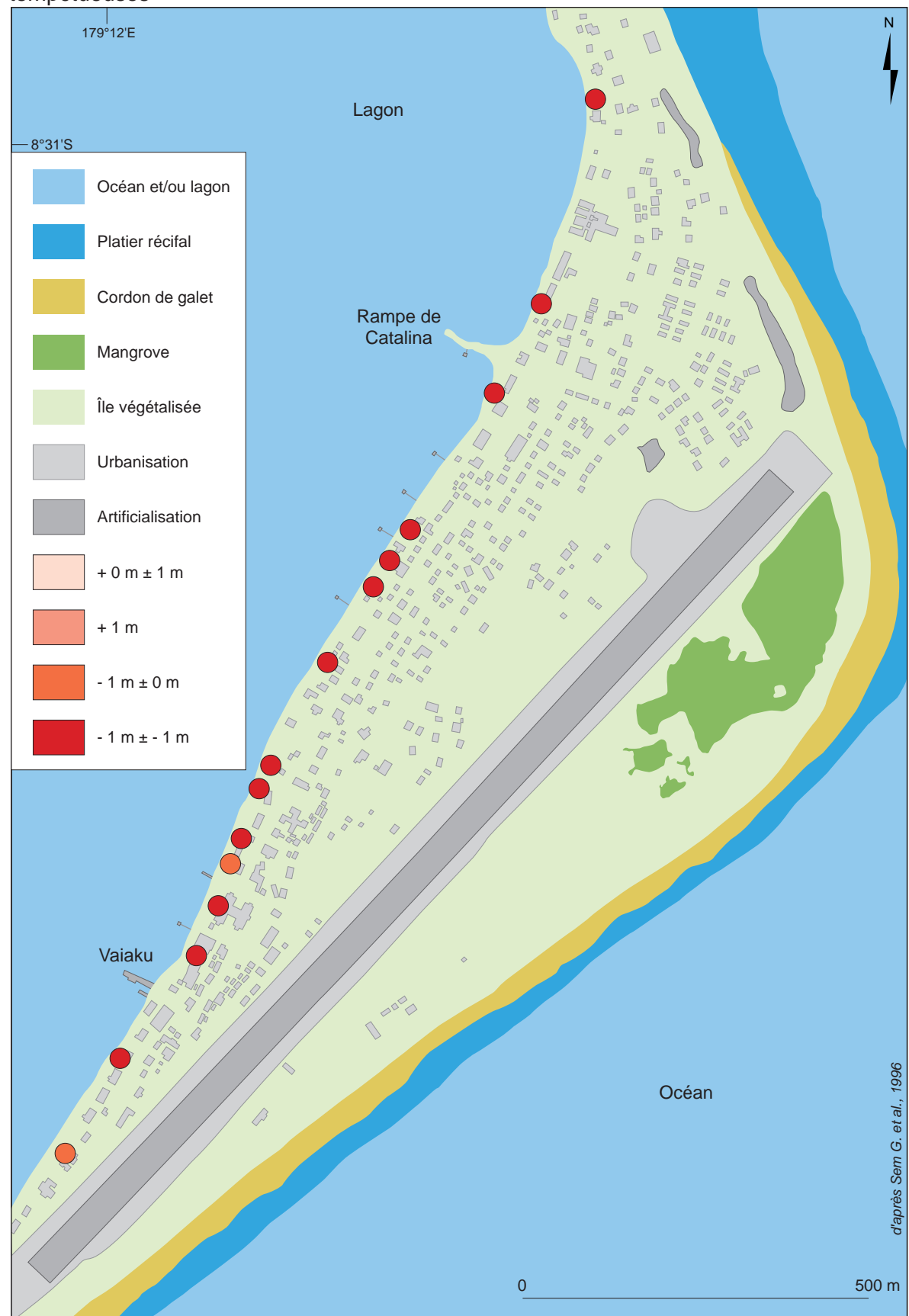
Pour D. Hopley (1994), la loi de Bruun ne peut s'appliquer aux littoraux coralliens entourés de récifs. La réponse des îles coralliennes face à des modifications extérieures doit être recherchée dans le comportement des récifs qui les approvisionnent en sédiments et dans la vitesse de remontée. Certains auteurs (McLean, 1989 et Parnell, 1989 *in* Hopley D., 1994) semblent être d'ailleurs optimistes quant à la réponse des îles face à une remontée du niveau de la mer. Ils estiment que les platiers actuels sont recouverts par une couche suffisamment importante de sédiments qui pourraient approvisionner les îles en cas d'une élévation avérée. Il faudrait pour cela une vitesse suffisante des vagues et des courants au sein du platier récifal, estimée à 25 nœuds, pour permettre aux sédiments d'être transportés vers le point d'accumulation. Ces auteurs ont montré qu'un haut niveau pourrait permettre des mouvements sédimentaires plus importants au sein du platier. Si l'on ajoute à cet apport de réserve celui fourni par le récif, qui doit être impérativement en bonne santé, il faut être assez optimiste pour les îles naturelles. Toutefois, nous pouvons nous interroger sur l'avenir de structures totalement artificialisées comme l'île de Malé. Des solutions paraissent difficilement envisageables ou alors à des coûts extrêmement onéreux, que ces micro-Etats insulaires ne pourront assumer seuls, et pour une longévité des ouvrages assez relative. Dans certains cas, les épis ou les enrochements vont pouvoir servir de supports aux dépôts sédimentaires, comme aux Tuvalu (cf. Figures 142, 143), mais, dans le cas d'une île entourée aux trois quarts de structures verticales, l'avenir semble assez compromis.

Les données, qui illustrent l'impact qu'ont pu avoir les variations rapides du niveau marin et les changements environnementaux qui les ont accompagnées sur les récifs coralliens au cours du Quaternaire, sont encore trop rares pour évaluer les bouleversements qui sont susceptibles d'affecter les systèmes littoraux, à la suite des modifications climatiques envisagées depuis quelques décennies.

Figure 142 : Comportement insulaire en cas d'élévation de + 1 m en conditions météorologiques normales



Figure 143 : Comportement insulaire en cas d'élévation de + 1 m en conditions tempétueuses



d'après Sem G. et al., 1996

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Les observations et analyses présentées dans cette partie tendent à atténuer la perception des îles comme des territoires nécessairement vulnérables. Ainsi, l'exploitation des photographies aériennes, des cartes et des documents anciens montre une certaine résistance des accumulations sédimentaires face aux événements et forçages extérieurs qui influent sur leur morphologie.

Les observations effectuées notamment à partir de photographies aériennes nous ont permis de réajuster quelques vérités trop rapidement admises comme celle des vents saisonniers orientés nord-est – sud-ouest alors que les analyses morphométriques des îles et des récifs ont dégagé deux grandes tendances, est-sud-est et ouest-nord-ouest.

La présence accrue de dalles de beach rock conforte l'idée d'une érosion avérée mais peut-être cette apparition est-elle liée à la raréfaction du stock sédimentaire ou à la faible vitesse d'approvisionnement sédimentaire par le récif ?

Les variations anémométriques, pluviométriques, eustatiques observées sur le court terme se sont révélées minimes et ne permettent pas d'établir une tendance évolutive générale, puisqu'elle ne peut être appliquée à nos deux archipels dont les comportements sont différents.

Peut-on être optimiste au point de croire qu'en situation de réchauffement avéré des températures de l'atmosphère, une augmentation de l'évaporation des eaux limiterait leur montée ?

TROISIÈME PARTIE

L'HOMME ET LA GESTION DU MILIEU

L'évolution régressive des littoraux des micro-Etats insulaires est interprétée, par leurs populations locales et leurs gouvernants, comme la conséquence de modifications des paramètres naturels et notamment la multiplication des événements tempêteux. L'homme est rarement considéré comme un agent morphogénique. Ce n'est que récemment que les organisations internationales ont mentionné dans leurs rapports annuels son impact dommageable sur le milieu par le biais de prélèvements, de constructions... C'est dans cette perspective que nous avons souhaité orienté notre réflexion. S'il est impossible de quantifier l'extraction des matériaux du fait de la multiplicité des utilisations, nous pouvons au travers de divers exemples montrer l'importance qu'elle prend à l'échelle d'un archipel ou d'une île.

Les causes de cette ultra-sensibilité littorale sont liées à la pression anthropique de plus en plus pressante et pesante sur les milieux. L'augmentation de la population, les travaux insulaires, les politiques de développements étatiques sont responsables de nombreux maux.

Au-delà des risques naturels qui peuvent être perturbateurs pour les micro-systèmes que sont les îles, ou les macro-systèmes que sont les archipels insulaires, il est intéressant d'observer et d'analyser le comportement des hommes dans ces territoires. Exercent-ils une trop grande pression pour un milieu naturel vulnérable ? Ont-ils une responsabilité sur l'évolution des littoraux ? Doivent-ils faire évoluer leurs mentalités ?

Pour le comprendre, nous allons nous intéresser à la distribution de la population à l'échelle des archipels, à l'exploitation qu'elle fait de ses milieux, à ses comportements passés et à venir.

D'après K. Wyrski (1990), la croissance exponentielle de la population est sans aucun doute plus préjudiciable que l'élévation du niveau de la mer, de l'effet de serre additionnel ou de tout autre prévision sur les changements climatiques. En effet, le développement rapide des centres urbains pose un certain nombre de problèmes pour les micro-Etats insulaires, comme : la dégradation et la destruction des habitats côtiers, les eaux usées et la qualité de l'eau douce, l'augmentation des déchets, l'érosion des côtes par prélèvement de matériaux sablo-coralliens, l'inadéquation des infrastructures, etc.

Chapitre 7 – Les milieux insulaires face aux nouvelles contraintes socio-économiques

L'organisation du peuplement et le développement touristique sont au cœur des problématiques de gestion et d'aménagement d'un territoire. Pour cela, nous avons souhaité présenter les politiques entreprises dans une perspective de développement réfléchi et concertée dans la perspective de changements globaux.

Les Tuvalu, anciennes îles Ellice, sont considérées encore à l'heure actuelle comme des îles sous-développées par rapport à leur potentiel. Les apports de modernité, venant de l'étranger, sont souvent filtrés et adaptés car les habitants tendent à « magnifier la notion de tradition » (Doumenge J-P., 1984). Le nom Ellice fut donné par le Capitaine Arent de Peyster lors de la découverte de l'archipel en 1819. Les Tuvalu ont été sous domination britannique à partir de 1877, puis sont devenues un protectorat en 1892. Le 10 novembre 1915, le groupe des Gilbert-Ellice accède au statut de colonie. Le 1^{er} octobre 1975, les Tuvalu se séparent des Gilbert, désormais dénommées Kiribati. Ce n'est qu'en janvier 1976 que l'administration de la nouvelle colonie est transférée de Tarawa, capitale des Kiribati et de l'ancienne colonie, à Funafuti. Les Tuvalu deviennent indépendantes le 1^{er} octobre 1978 en tant que monarchie constitutionnelle avec un parlement démocratique élu, composé de quinze membres. Le Premier ministre actuel, Son Excellence Saufatu Sopoanga, a été élu le 2 août 2002. Le gouverneur général, Son Excellence Tomasi Puapua, est le représentant direct de Sa Majesté la reine d'Angleterre, par qui il est nommé.

Certains ont pu s'interroger sur le caractère viable de ce nouvel État puisque sa création ne s'est faite qu'après une séparation. Pourtant, dans ce cas précis, les Tuvaluans souhaitaient cette indépendance car, un tel rattachement était jugé incohérent puisqu'ils ne partagent pas la même culture avec les Kiribatiens, qui sont mélanésiens, ni la même histoire. Leur indépendance s'est faite à leurs dépens puisqu'en quittant l'archipel, les Britanniques n'ont laissé qu'un bateau assurant la desserte des autres îles de l'archipel. Il a fallu redémarrer l'économie et les premières devises sont venues de la philatélie, qui rapporte à l'Etat, encore à l'heure actuelle, entre 100 000 et 200 000 dollars par an.

Les Maldives sont devenues un protectorat de la Couronne à partir de 1796, quand les Britanniques prirent la succession des Hollandais, et cette décision fut officialisée en 1887. République en janvier 1953, après l'abolition du sultanat par Amin Didi, qui devint le premier président, l'archipel est devenu indépendant le 26 juillet 1965. Le président actuel, M.A. Gayoom (au pouvoir depuis le 11 novembre 1978) est à la fois le chef de l'Etat et le chef du gouvernement. Il est nommé par les représentants du peuple puis est soumis à référendum national. Le chef de l'Etat a été réélu en 1983, 1988, 1993, 1998, 2003, avec, à chaque fois, plus de 90 % des voix ! Bien qu'aucun parti ne soit théoriquement interdit, il n'existe toutefois aucune opposition au pouvoir en place. Dans un rapport d'Amnesty International en date de 2003, le gouvernement maldivien est accusé de répressions politiques et de tortures.

7.1. Particularités des micro-Etats insulaires

La personnalité de chacun de ces Etats dépend de ses particularités géographiques, de son système politique et économique, de sa dépendance vis-à-vis de l'étranger, de ses conditions climatiques, sociales... Certains sont de simples îles océaniques comme la Barbade ou sont constitués d'une dizaine d'îles comme les Tuvalu, d'une centaine comme les Tonga ou de plusieurs milliers comme les Maldives. Ils ont souhaité se regrouper afin de constituer un groupe de pression soucieux de sa survie. Les caractéristiques d'un micro-Etat insulaire ont été clairement définies par F. Doumenge (1985) : l'exiguïté de son territoire, une large zone économique exclusive, des ressources naturelles limitées, une vulnérabilité face aux événements climatiques (tempêtes, cyclones...), un relatif isolement de son territoire, une grande dépendance économique vis-à-vis des marchés étrangers, une capitale surpeuplée avec une croissance démographique forte, peu d'infrastructures de développement, et peu ou pas de ressources économiques ou humaines pour leur permettre de s'adapter aux changements. Il est admis que les micro-Etats atolliens couvrent moins de 500 km², qu'ils sont composés de plusieurs îles ayant une altitude inférieure à 4 m et que la proportion de terre sous leur juridiction, par rapport à leur ZEE, est extrêmement réduite, inférieure à 0,001 % du territoire (Pernetta J.C., 1989a), ce qui explique que de nombreux Etats dépendent plus de l'exploitation des ressources marines pour leur subsistance.

A ce titre, les Tuvalu et les Maldives sont différents. Les Tuvalu disposent de peu de ressources d'exportation, les deux principales sources de revenus étant la vente des licences de pêche (0,5 millions \$ US chaque licence, pour les Japonais, Américains, Taiwanais, Coréens qui viennent pêcher dans leur ZEE, principalement du thon et de la morue), et le service des marins tuvaluans sur des bateaux de commerce internationaux. Sur les 800 marins comptabilisés en 2003, entre 300 et 400 sont sur des bateaux étrangers, rapportant à l'Etat environ 2,5 millions d'euros par an, et les 400 ou 500 restants sont dans les autres îles. Le PIB est de 11 millions \$ US par an et le revenu annuel par habitant est de 1 000 \$ US. Il s'agit, d'après les critères des Nations Unis, d'un pays pauvre. Le développement de l'archipel dépend des donateurs étrangers. En 1990, la Nouvelle-Zélande a électrifié une portion de l'île de Fongafale ; en 1991, les Etats-Unis ont pavé la route ; en 1992 les Taiwanais ont construit le Vaiaku Lagi hôtel, seul hôtel actuel de l'île ; la Communauté Européenne a financé la réfection de la piste d'aviation en 1992 et l'Australie a construit en 1993 le nouveau terminal de l'aéroport.

Les Maldives, de par leur sur-fréquentation touristique, connaissent un développement économique remarquable par rapport à d'autres micro-Etats insulaires. Toutefois, dans le domaine alimentaire, les Maldives sont économico-dépendants. En effet, un grand nombre de produits sont importés pour diversifier l'offre alimentaire. Malheureusement le coût de l'importation est si élevé que ces produits ne sont que très rarement destinés à la population locale, dont le régime alimentaire ne se diversifie pas (poissons, riz). Il existe des supermarchés qui proposent ces produits mais ils sont fréquentés par la population étrangère travaillant dans la capitale ou par des Maldiviens ayant un niveau de vie élevé. Pourquoi une telle dépendance alors que les Maldives étaient pourtant considérées comme une terre assez riche ? Les récits insulaires de F. Pyrard de Laval (1998) dressent une longue liste de produits cultivés sur place comme, par exemple, le mil, diverses racines, des citrons, des grenades, des oranges, des bananes... A l'heure actuelle, la quasi-totalité de ces produits sont importés malgré une bonne reprise d'une production locale, notamment dans l'île de Foammulah. C'est par le biais des VSO⁵⁴ qu'une agriculture vivrière tournant autour de la production de taro, de céréales, et de divers légumes, a été instaurée ou réinstaurée, suivant le cas, dans plusieurs îles de l'archipel. En 1989 (Edwards A. J., 1989), les terres cultivées représentaient 2 780 ha dont 1 792 sont localisés dans les îles habitées et 988 dans les îles inhabitées. Les principaux atolls agricoles sont les atolls de Haa Alif, Haa Dhaal, Shaviyani, Noonu, Lhaviyani, Kaafu, Alif Alif, Laamu, Gaaf Dhaal, Gnaviyani et Seenu. C'est également dans la perspective de réduire la dépendance économique des îles locales vis-à-vis de la capitale que le programme « poverty and atoll development » a vu le jour. Deux atolls, Noonu et Shaviyani, ont été choisis pour initier ce programme social qui vise à déterminer le besoin des populations en fonction du niveau de vie... Pour cela, une échelle de pauvreté a été établie permettant

⁵⁴ Volonters Service Overseas

de dégager trois catégories sociales différentes : celles qui vivent avec 7 Rf par jour, 10 Rf par jour ou 15 Rf par jour. A partir de là, un indice national sera établi afin de permettre de mieux cibler les aides à apporter.

L'admission des Maldives comme le 117^{ème} pays membre de l'ONU le 21 septembre 1965 a été le déclencheur de nombre de demandes des autres micro-Etats pour leur accession auprès des organismes internationaux compétents. Vingt Etats seront ainsi admis à l'ONU entre 1964 et 1983 (Doumenge F., 1985). La Grande-Bretagne est responsable à elle seule de l'adhésion de dix-sept petits Etats insulaires. L'adhésion des Tuvalu, 189^{ème} membre de l'ONU, est plus tardive puisqu'elle a été effective le 5 septembre 2000. Son retard d'adhésion est dû à son incapacité à régler les frais qu'impute un rattachement à une telle organisation. D'après Faimalaga Luka, ancien Premier Ministre, la cotisation annuelle et le rattachement permanent de quatre personnes coûtent 750 000 dollars par an au gouvernement (Soula C., 2001). Indirectement, c'est l'indépendance qui lui a assuré ce financement en retrouvant son nom initial. A l'ère d'internet, l'abréviation du nom de Tuvalu en .tv lui a permis de bénéficier de la perception des droits liés à l'utilisation de ce sigle.

Pour ces Etats, l'océan exerce une grande influence en structurant les domaines naturels et en conditionnant l'organisation socio-économique des territoires.

Le désenclavement des micro-Etats insulaires est un facteur primordial du développement. Ainsi, la présence d'un aéroport international est essentielle à l'ouverture du pays. Si cela se vérifie pour les Maldives par la présence de l'aéroport international d'Hulhulé ainsi que d'aéroports annexes dans les autres atolls de l'archipel, cela ne s'applique pas totalement aux Tuvalu. L'aéroport international se situe dans l'île de Fongafale, mais, si le terme « international » implique des échanges multi-étatiques, il s'avère qu'en réalité seule une liaison avec les Fidji est assurée deux fois par semaine, le lundi et le jeudi, lorsque l'avion n'est pas en maintenance. La piste d'atterrissage nécessite un entretien constant qui exige un apport financier annuel auquel le gouvernement ne peut contribuer. C'est en cela que le don de pays tiers est essentiel pour faire fonctionner l'Etat et permettre aux Tuvalu de ne pas être coupé du monde. Il existe sur les îles extérieures des pistes d'atterrissage, mais, par manque de moyens, elles ont été abandonnées depuis l'indépendance de l'archipel.

Une autre particularité des micro-Etats insulaires vient du fait qu'ils reçoivent de nombreuses aides de pays comme l'Australie, la France, l'Arabie Saoudite, la Nouvelle-Zélande, le Japon..., et d'organisations internationales comme les Nations Unies, le Commonwealth, l'Union Européenne.

Suivant les relations que les micro-Etats entretiennent avec les pays donateurs, l'aide sera plus ou moins importante. Ainsi, les dons assurés par la France, l'Australie, le Royaume-Uni et le Japon, qui sont les quatre plus importants financiers de la zone Pacifique (Blanchet G., 1997), leur permettent par ce biais d'élargir leur sphère d'influence, et cela à moindre frais, dans des instances internationales

comme l'ONU où, est-il besoin de rappeler, chaque pays dispose d'une voix, quelle que soit sa taille. C'est ainsi que depuis que les Tuvalu sont membres des Nations Unies, ils sont courtisés par de nombreux Etats comme la France qui souhaite ouvrir une antenne de l'ambassade des Fidji sur le territoire en choisissant un membre de la communauté tuvaluane parlant le français. Les micro-Etats, quant à eux, tirent avantage de cette situation car ils pèsent un poids important sur le plan géostratégique et politique.

Malgré une aide initialement comparable, l'évolution des deux archipels a été différente. Nous pouvons presque parler du « paradoxe Pacifique » qui s'explique « par la particularité des économies insulaires, l'étroitesse de leur marché intérieur, l'importance du secteur public légué par l'époque coloniale, l'insuffisance de marchés financiers embryonnaires et une situation particulière où se conjuguent coutume et modernité, abondance et subsistance » (Blanchet G., 1997). Ayant conscience d'avoir favorisé une économie déconnectée de la réalité, certains donateurs ne souhaitent pas apporter qu'une aide financière mais également un savoir-faire. Aux Tuvalu, pour que les projets fonctionnent, il faut que l'investissement concerne le bien-être de la communauté et que cela se traduise par des échanges et des obligations réciproques. Seul, le domaine d'exploitation « .TV » a permis de rapporter à l'Etat des fonds qui lui sont propres. A l'heure actuelle, il représente 20 % du PNB et rapporte à l'Etat une somme fixe de 2,2 millions \$ US par an, plus un intéressement. Il doit rapporter environ 50 millions \$ US pour une période fixée à 12,5 ans, si les clauses du contrat, modifiables tous les cinq ans, n'évoluent pas. Or, le Premier Ministre, Saufatu Sopoanga, constate que « le bénéfice sur le long terme de ce domaine est en train de diminuer ».

Aux Maldives, et plus particulièrement dans la capitale, tout est tourné vers la « maximisation du profit » (Blanchet G., 1997), alors que, dans les îles locales, l'organisation de la société oscille entre une forte pression communautaire et l'autonomie familiale.

La dépendance économique des micro-Etats face aux grandes puissances peut être telle que certains ont accepté de devenir le réceptacle des poubelles des pays développés, comme l'archipel des Marshall. En 1987, son Président, Son Excellence Amata Kabua (Van Dyke J.M., 1991) a proposé aux Américains de stocker leurs déchets nucléaires dans des atolls inhabités de son archipel, comme ceux d'Erituk, Bikini et Eniwetak, moyennant des aides substantielles pour le développement de l'Etat⁵⁵.

Ces aides accordées aux micro-territoires ne sont pas uniquement idéologiques. L'Australie comme la Nouvelle-Zélande souhaitent devenir les voisins indispensables pour les micro-Etats insulaires de l'océan Pacifique, comme les Tuvalu, les Kiribati, les Tokelau, ce qu'ils arrivent par ailleurs à faire, en

⁵⁵ La république des Marshall est considérée comme un site supplémentaire dans le traitement des déchets nucléaires de l'armée américaine. Il s'agit de la section 5041 de l'*US Nuclear Waste Policy Amendments Act* de 1987.

s'immisçant économiquement dans leurs vies par le biais du PACER⁵⁶. Par cette voie, les micro-Etats sont contraint de conclure des accords de libre-échange avec l'Australie et la Nouvelle-Zélande⁵⁷ qui remplacent le gouvernement britannique qui se fait discret, éloignent l'influence française et européenne et exercent une pression sans cesse grandissante sur ces territoires au point d'avoir approché la rupture⁵⁸. Par leurs actions, ils sont assimilés à de nouveaux colonisateurs qui créent des bases avancées de leur territoire au-delà de leur frontière.

Aux Maldives, les aides accordées par les pays tiers ne se font pas dans un esprit de dépendance économique ou politique, mais est plus idéologique ou religieuse. Ainsi, les aides accordées par la Libye, le Royaume d'Arabie Saoudite, les Emirats Arabes Unis se font dans un esprit de bonne pratique de l'Islam et les aides sont proportionnées à la pratique religieuse.

7.1.1. Notion de surpopulation

La surpopulation des îles capitales est une des particularités des micro-Etats insulaires. A ce titre, les Maldives comme les Tuvalu possèdent deux capitales surpeuplées, bien que leur situation ne puisse être exactement comparée.

D'après R. South et P. Skelton (2000), la population de l'archipel des Tuvalu est de 10 144 habitants (cf. Figure 144) dont plus de 40 % vivent dans l'atoll de Funafuti, et, plus particulièrement, sur l'île de Fongafale où la majorité de la population se concentre le long de la piste d'atterrissage (cf. Figure 145 - annexe). Cette île capitale est parvenue à sortir de l'impasse des cadres coutumiers, à la différence des îles extérieures, mais subit en contrepartie des problèmes liés à la surpopulation.

On estime la densité de population à l'échelle de l'archipel à 390 hab/km² en 2000 et à 428 en 2002⁵⁹. La densité de population dans l'île capitale était de 2 703 hab/km² en 1991 (d'après les données de population du dernier recensement officiel de 1991) et de 3 239 hab/km² en 1996 (d'après les données de population fournies par AusAid, 1996 *in* Falkland A.C., 1999). Malgré la volonté gouvernementale de réduire la pression sur l'île de Fongafale (Government of Tuvalu, 1995), en limitant l'immigration insulaire ou en décentralisant certaines activités et services sur d'autres atolls, rien ne semble évoluer en ce sens. L'île de Fongafale est victime de son succès et reste la destination de l'exode insulaire des îles extérieures (cf. Figure 146 - annexe). Historiquement, l'atoll de Funafuti a été un des derniers sites à être peuplé, exception faite de l'île de Niulakita qui fut exploitée pour son guano et son coprah jusqu'en 1946, date à laquelle les hommes sont venus y habiter. Ce fait expliquant le nom originel des Tuvalu, « Atu Tuvalu » qui signifie « huit qui se dressent ensemble » (Roberts R.G., 1958).

⁵⁶ *Pacific Agreement on Closer Economic Relations*

⁵⁷ T. Misa (2004), *Un accord commercial qui ruine les micro-Etats*, Courrier International, n° 709.

⁵⁸ L'Australie, « grand frère » des îles du Pacifiques par F. Thérin – <http://www.lemonde.fr>

⁵⁹ Communication internet avec le Centre Statistique gouvernemental

Figure 144 : Evolution de la population totale dans l'archipel des Tuvalu

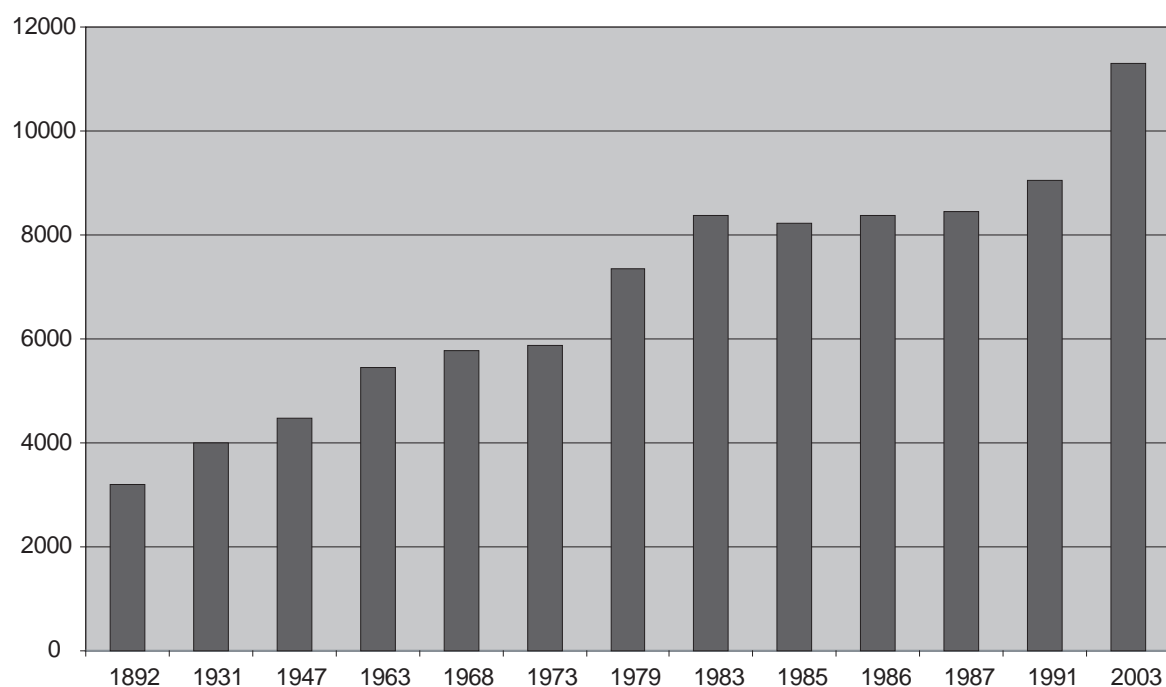
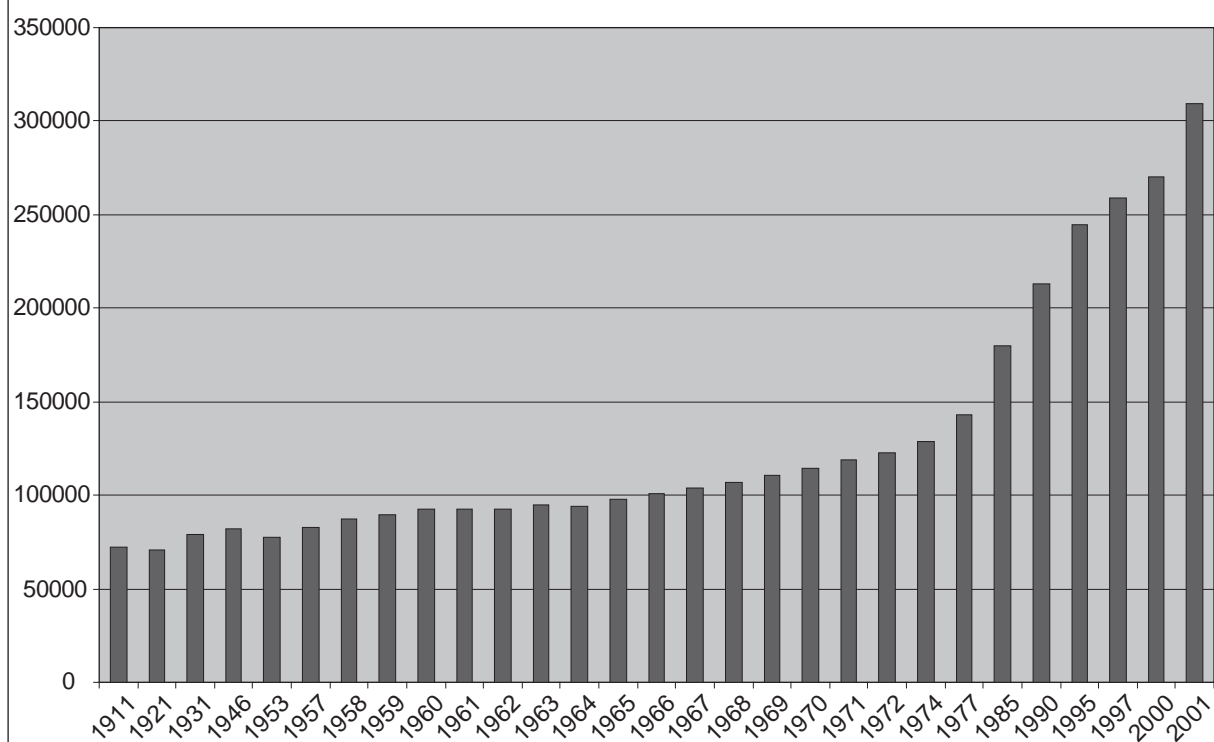


Figure 147 : Evolution de la population totale dans l'archipel des Maldives



En 1973, l'atoll de Funafuti était moins peuplé que des îles comme Nanumea, Nukunono et Vaitupu. Ce n'est qu'avec l'indépendance et l'établissement des pouvoirs politiques dans l'île de Fongafale, qu'il y eut une importante migration insulaire. On y trouve l'ensemble des pouvoirs politiques, sociaux, économiques... et les différentes administrations qui font de l'Etat, le premier employeur. Les jeunes des autres îles⁶⁰ viennent y chercher un travail et y acquièrent une vision du monde extérieur. Les quelques décentralisations qui ont été instituées fonctionnent bien comme dans l'île d'Amatuku, située dans l'atoll de Funafuti, qui héberge une école de la Marine marchande, et l'île de Vaitupu, située dans la partie centrale de l'archipel qui abrite l'école secondaire et cela depuis le début du XX^e siècle, lui conférant une place importante à l'échelle de l'archipel. Cette position centrale lui assure la venue des étudiants de toutes les îles. Il a été noté que, depuis cette implantation, l'île de Vaitupu semble garder sa population (Government of Tuvalu, 1995) et développe même des économies annexes comme la micro-exploitation agricole récemment créée par des femmes de l'île. Il pourrait être intéressant d'envisager une décentralisation d'une partie des activités en cas des modifications climatiques annoncées. En effet, s'il y a une recrudescence des cyclones et/ou des tempêtes, ils ne frapperont pas l'ensemble de l'archipel avec la même intensité laissant ainsi des ressources dans les autres îles.

Victime de son attraction, Fongafale a dû être confrontée au retour des 1 000 mineurs de l'île phosphatée de Nauru depuis 1999–2000. Nauru est la seule île des micro-Etats insulaires du Pacifique, avec Fongafale, à connaître, une importante pression anthropique avec plus de 593 hab/km². Le départ des mineurs aurait dû lui assurer une baisse démographique importante, mais sa fonction de nouvelle île-exil du Pacifique, notamment avec les 460 réfugiés afghans qui s'y sont établis en 2001⁶¹, pourrait augmenter la pression sur le milieu. Même Tarawa, capitale des Kiribati, et pourtant ancienne capitale des Gilbert-Ellice, ne compte que 112 hab/km² (Salvat B., 2000).

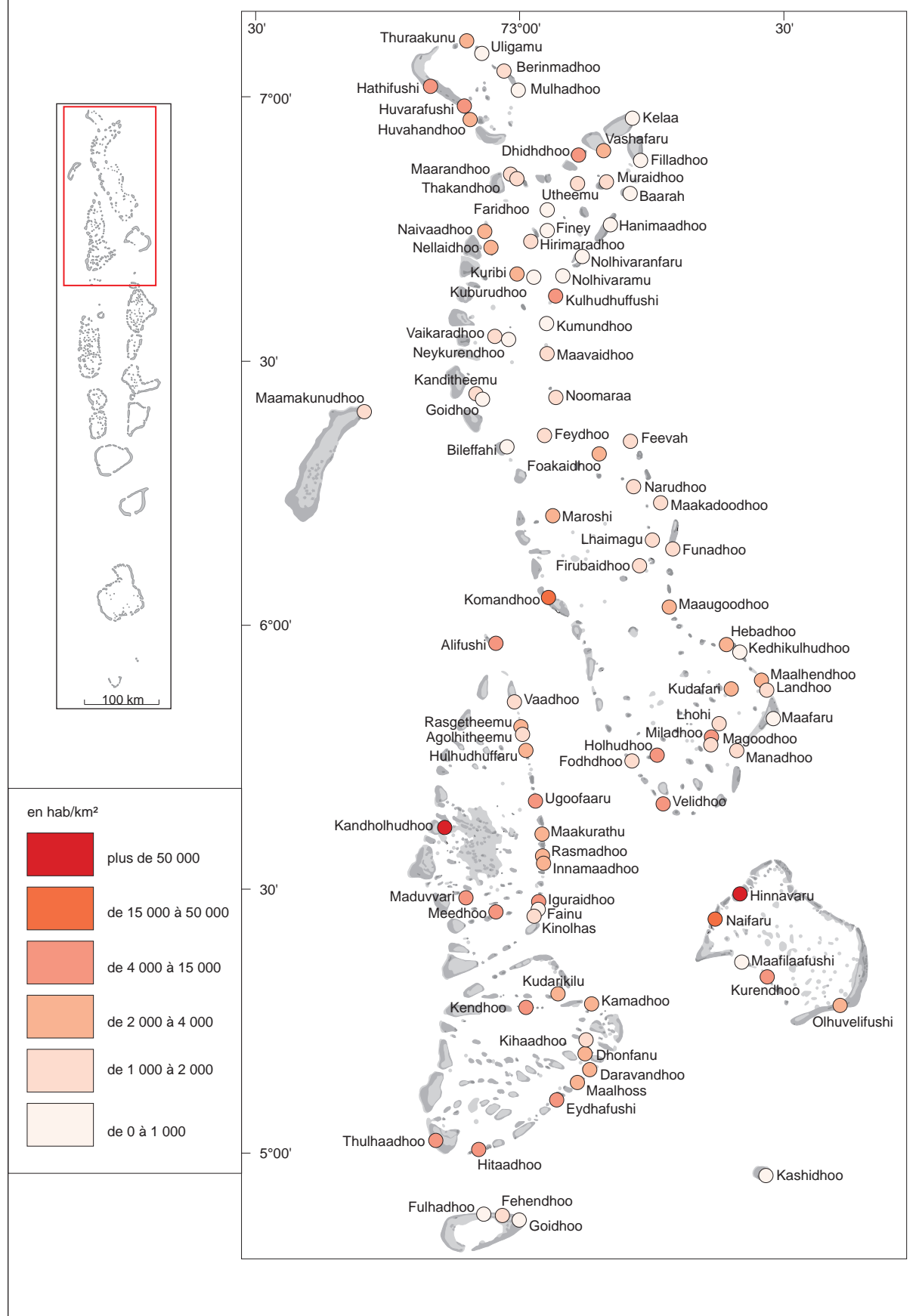
L'exode insulaire vers les capitales s'explique par différentes raisons comme l'abandon d'activités traditionnelles contraignantes pour des emplois urbains ou la faible diversification des cultures, qu'elles soient de subsistances ou commerciales (Lawrence R.J., 1985).

Aux Maldives, suivant les surfaces de terre indiquées dans les ouvrages, la densité de population à l'échelle de l'archipel oscille entre 1 072 hab/km² (South R. et Skelton P., 2000) à 1 415 hab/km² (Naseer A. et Hatcher B.G., 2004), pour une population estimée à 321 844 habitants (cf. Figure 147), si l'on considère les données que nous avons collectées auprès du Ministère de l'Administration des atolls lors du traitement du comptage annuel de 2001. Si l'on se concentre sur les seules îles habitées (317 965) et sur leurs superficies (112,93), la densité de population est de 2 815 hab/km² en 2001 pour l'ensemble de l'archipel (cf. Figures 148 et 149, 150, 151 - annexe). Toutefois, cette donnée ne tient pas compte du fait qu'il existe des îles isolées dont on ne connaît pas la superficie mais

⁶⁰ Communément appelées *Outer islands*

⁶¹ Libération du 02/09/01

Figure 148 : Densité de population dans les îles de l'archipel des Maldives



qui concentraient 3 879 habitants en 2001. L'île de Malé, dans l'atoll de Kaafu, caractérise tout à fait les micro-Etats insulaires (cf. Figure 152). Ainsi, en 1921, sur les 70 413 habitants que compte l'archipel, 6 127 vivent dans l'île capitale, soit une densité de population d'environ 5 519 hab/km². En 1989, à la suite d'une extension urbaine, quasi continue depuis la fin de la décennie 1970, la ville concentre à elle seule plus de 27 777 hab/km². En 2000, d'après le dernier recensement de la population, la densité excède les 38 577 hab/km².

Tableau 12 : Densité de population en 1985

Etat	Superficie (en km²)	Nombre d'habitants	Densité de population (en hab/km²)
Tuvalu	26	8 229	317
Maldives	298	181 453	609
Malé	1,29	44 200	34 263

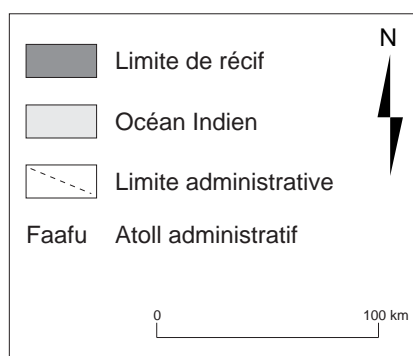
L'exode vers les capitales est tel qu'il est la cause d'importantes pressions sur le milieu insulaire environnemental, comme, par exemple, sur la lentille d'eau douce de Ghyben-Herzberg localisée sous les îles atolliennes.

Cette pression sur les ressources en eau est due à plusieurs paramètres comme la demande croissante en eau du fait d'une augmentation de la population, de l'importance de la densité de l'habitat qui réduit la surface sur l'île pour le rechargement de la nappe, de la compaction des éléments formant les routes empêchant une bonne perméabilité. Si elle ne constitue plus la principale source d'approvisionnement en eau pour les habitants de Malé et pour ceux de Fongafale, bien que ceux ci soient plus dépendants, cette lentille reste très importante pour les autres îles locales.

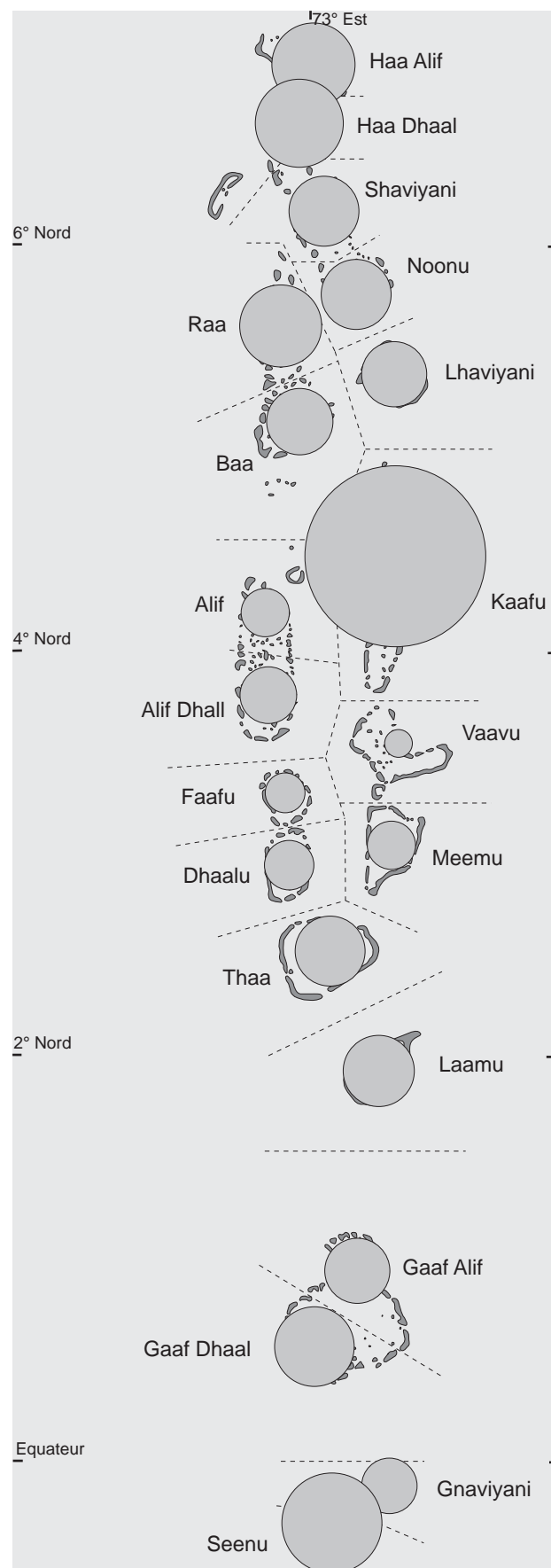
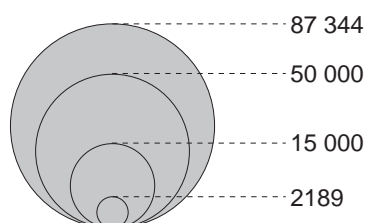
L'eau douce contenue dans la lentille, de densité égale à 1, est plus légère que la densité de l'eau salée qui est généralement de 1,025 en moyenne, ce qui lui permet de flotter sur l'eau salée sous-jacente. Chaque nouveau pompage, chaque prélèvement réduit la lentille et la rend vulnérable. Il a été déterminé que la lentille présente sous la ville de Malé devait se situer initialement jusqu'à 20 m de profondeur (Pernetta J.C., 1989a). En 1982, la nappe se localise jusqu'à 13 m de profondeur et continue de s'amoinrir avec la pression anthropique puisqu'en 1989, elle s'étend, dans le centre de l'île, jusqu'à 3 m de profondeur. En 1983, on estime sa contenance à 6,14 millions de m³, alors qu'en 1986, elle n'aurait été que de 4,84 millions de m³. Cette réduction est due non seulement à la pression anthropique, mais également à la multiplication des routes et des habitations qui ne permettent plus un réapprovisionnement naturel par perméabilité. C'est dans ce but que des travaux de pavage des routes, en remplacement de l'enrobé, ont été entrepris.

Amincie et proche du niveau du sol, la lentille peut subir les attaques latérales de l'eau salée, notamment quand elle est initialement peu épaisse comme c'est le cas dans l'atoll de Funafuti où des mesures ont révélé qu'elle mesurait au maximum 3,2 m d'épaisseur et au minimum 0,2 m en 1987

Figure 152 : Répartition de la population maldivienne en 2001 dans les différentes provinces administratives



Nombre de populations :



(Van Putten F., 1988). A part l'île de Fale dans l'atoll de Nukufetau où l'épaisseur de la lentille a été estimé à 12,8 m, dans les huit autres îles, l'épaisseur se situe entre 2 et 4 m. Quelle peut être désormais son épaisseur lorsque l'on sait que, depuis 1987, la densité de population dans l'île capitale est passée de 1 152 hab/km² à 3 239 hab/km².

Ceci est encore plus légitime dans le cas de nos îles puisque les risques d'intrusion saline sont d'autant plus forts que les îles sont petites. Le bombement supérieur de la lentille va s'atténuer et l'eau douce peut, dans certains cas, atteindre le niveau du sol, soit lors des grandes marées, comme cela s'observe dans l'île de Fongafale, soit en cas de prélèvements trop importants. Les modifications locales et ponctuelles dans le régime des vents (NIWA, 1997) peuvent également expliquer de telles infiltrations, considérées à tort comme le seul fait de la remontée du niveau de la mer.

Ajoutons à cela la difficulté du renouvellement des eaux de la lentille par pénétration des pluies lorsque l'on observe sur l'île de Fongafale le nombre de maisons individuelles, de bâtiments administratifs, d'églises, de maneapa⁶², de borrow pit⁶³, et de voies enrobées (piste d'atterrissage et routes).

Dans de nombreuses îles locales, l'eau peut être impropre à la consommation, notamment durant la saison sèche, par une pollution anthropique. L'usage traditionnel veut que les besoins se fassent sur les côtes océanique ou lagunaire des îles. Une étude menée à Tarawa, dans la capitale des Kiribati, avait montré que cette pratique concernait plus de 60 % des familles (Solomon S.M. et Forbes D.L., 1999). Il faut ajouter au cycle des effluents organiques, s'infiltrant dans le sol ou dans le lagon, les effluents de porcs, de plus en plus nombreux dans la capitale. Cet élevage développé dans les années 1960, pour apporter des engrais naturels aux cultures de pulaka, pose désormais des problèmes environnementaux importants du fait de leur nombre toujours croissant. D'après des études récentes, on estime qu'un porc pollue trois fois plus qu'un homme (Bouchaud et Larminat, 1994 *in* Salomon J.-N., 2003).

Aux Maldives, des études menées à l'échelle de l'archipel ont montré (U.N.D.P., 1998) que la population ne possédant pas de toilettes était passée de 60 à 20 %, sauf dans l'atoll de Seenu, où ce chiffre avait très légèrement augmenté de 10 à 15 %. Malgré cette multiplication de lieux d'aisance, la pollution sur le milieu reste tout aussi importante mais à des degrés divers. Quand il existe des toilettes, soit les effluents humains sont dirigés vers l'océan, soit ils sont disposés dans une fosse située à même le sol, le *gifili*⁶⁴, qui est encore très utilisé dans les atolls comme Goidhoo, Raa ... Quand il n'y a pas de toilettes, les besoins se font sur les plages comme, par exemple, dans les îles de Naalaafushi (454 habitants en 2001) dans l'atoll de Meemu ou Hanimadhoo (1232 habitants en 2001) dans l'atoll de Haa Dhaal.

⁶² Maison communautaire

⁶³ Trous

⁶⁴ Toilette traditionnelle, correspondant à un simple trou dans le sol entouré par un mur

L'augmentation de la densité de population peut être la cause d'une déforestation des îles habitées, dans un premier temps, puis des îles voisines inhabitées dans un deuxième temps. Hormis Malé et Fongafale, bien que dans cette dernière les foyers ne soient pas tous équipés au gaz ou au kérosène, le bois reste la source première pour la cuisine, même s'il est en nette régression, notamment dans l'archipel des Maldives. S'il prédomine dans des atolls comme Haa Dhaal, Faafu, Goidhoo, Gnaviyani, il est désormais minoritaire comme dans les atolls de Seenu et de Kaafu qui sont bien développés.

7.2. Les fondements de l'occupation du sol

7.2.1. L'organisation du parcellaire, un morcellement foncier

Les îles capitales comme Tarawa ou Funafuti ont une densité de population élevée où la pression démographique est telle qu'il est difficile de trouver l'espace nécessaire aux nouvelles générations (Doumenge F., 1966). Pour préserver les droits de ces dernières, il a été pratiqué un morcellement extrême des terres qui pose désormais de nombreux problèmes en terme de gestion insulaire.

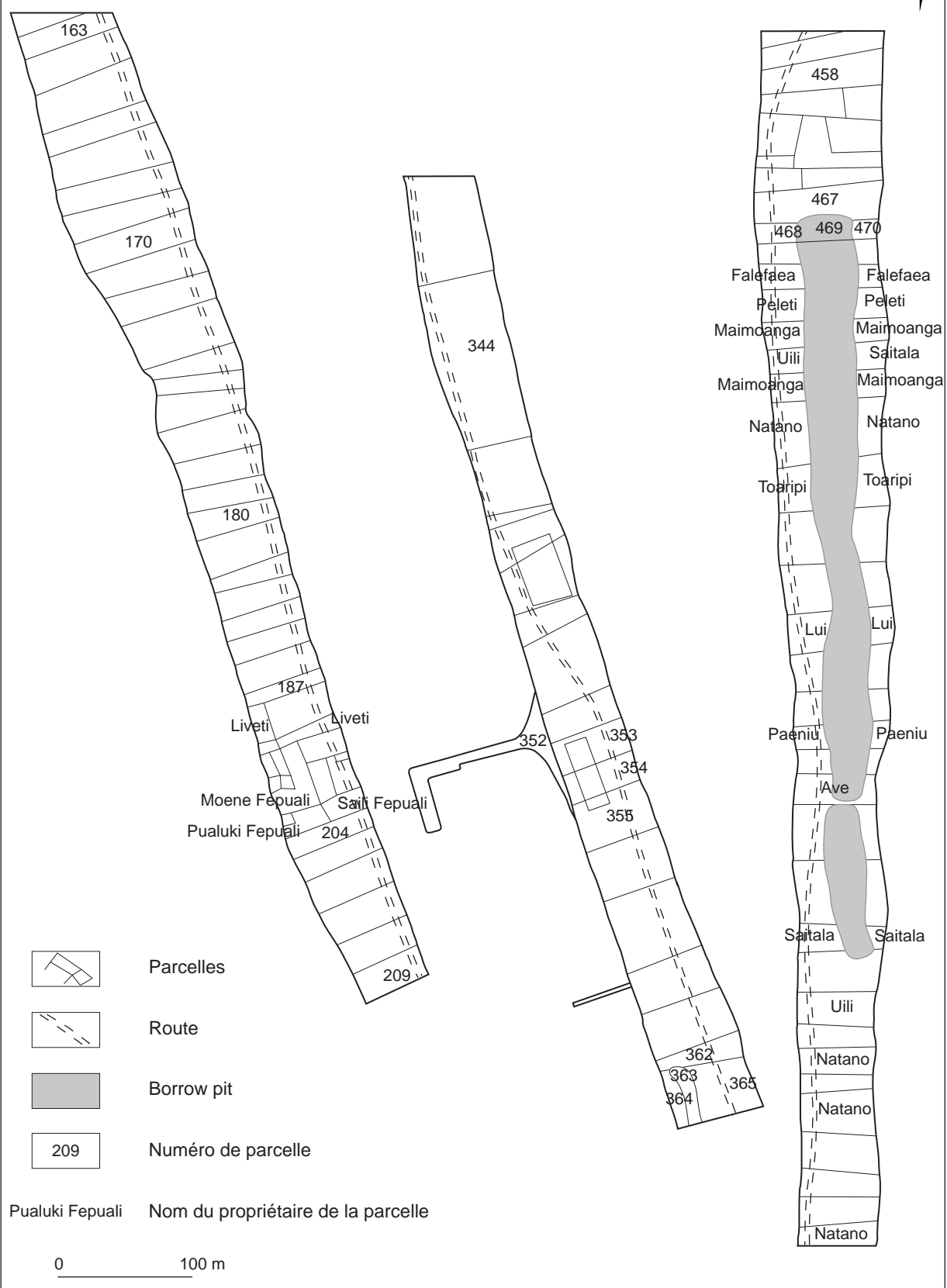
Le morcellement foncier complique la gestion des espaces côtiers. Aux Tuvalu, le problème du parcellaire est issu d'une pratique ancestrale. A l'origine, les terres appartenaient à des sages, qui étaient avant tous des guerriers. Lors des batailles, les victorieux redistribuaient une partie des terres des perdants et c'est ainsi que certaines de ces parcelles pouvaient être entièrement redéfinies. Cette pratique a été courante jusqu'à l'arrivée d'un pasteur (Elekana) qui a obligé les plus riches à partager leurs terres avec les pauvres, permettant ainsi à toute personne d'acquérir un bien propre de taille similaire.

Les terres émergées, qui représentent actuellement 26 km², sont divisées en 13 249 parcelles en 1987 (Government of Tuvalu, 1988) et 14 065 à l'heure actuelle, soit une taille moyenne de 0,17 ha par parcelle actuellement contre 0,22 ha en 1987, mais la taille des parcelles est variable, de quelques m² à 1 ou 2 ha.

L'exiguïté des territoires contraint une famille, à habiter, à travailler, à exploiter le sol, à brûler ou à enterrer ses morts sur la même parcelle de terre, comme dans l'île de Fongafale.

A l'origine, le parcellaire courait latéralement à travers l'île (cf. Figure 153), de l'océan vers le lagon. Il s'agissait de parcelles réduites mais disposées équitablement afin de ne léser aucun habitant de l'île. Ainsi, elles permettaient à chaque habitant d'avoir une proportion de terre dans la partie centrale des îles, où se trouve l'horizon organique le plus développé. Lorsque les divisions se sont multipliées, du fait des partages de terres lors des héritages, les insulaires ont cherché à obtenir des parcelles non plus

Figure 153 : Exemples de parcelles cadastrales dans la partie septentrionale de l'île de Fongafale.



disposées latéralement mais longitudinalement. Certaines parcelles s'avéraient totalement infertiles aux côtés d'autres plus riches. Le partage des terres, initialement équitable, s'est révélé injuste.

Tableau 13 : Importance du morcellement parcellaire dans les îles basses de l'archipel Tuvaluan

Île	Surface (en km ²)	Propriétaires individuels	Nombre de parcelles	Taille moyenne de la parcelle
Nanumea	3,58	3,56	1 399	0,26
Nanumaga	2,95	440	843	0'35
Niutao	2,12	417	2 037	0,1
Nui	3,29	90	871	0,38
Vaitupu	4,9	325	3 085	0,16
Nukufetau	3,06	223	2 856	0,11
Funafuti	2,36	87	1 516	0,16
Nukulaelae	1,70	79	641	0,27
Niulakita	0,41	1	1	

d'après le National Development Plan IV – 1988-1991

Le problème des divisions multiparcellaires a débuté avec l'arrivée des Européens avant laquelle les Tuvaluans pratiquaient l'infanticide, réglant ainsi le problème de l'héritage. Après le premier enfant, tous les autres étaient étouffés dès leur naissance, les exceptions concernant les adoptions pour un père célibataire.

Désormais, les hommes se disputent la moindre parcelle. Les limites entre les terrains sont contestées, les droits de jouissance sont remis en cause par les différents membres d'une même famille qui considèrent que la terre leur appartient et que les membres indirects n'en sont que des usufruitiers. Aux Tuvalu, le problème de l'acte de propriété reste entier. En effet, sans document légitime, les habitants se disputent des terres dont personne ne connaît véritablement le propriétaire originel, du fait des échanges, des héritages... Les seuls documents officiels sont obsolètes puisqu'ils datent des années 1930. Au-delà des querelles familiales, cette division insulaire multiparcellaire pose des problèmes majeurs en terme de protection côtière et de collecte de matériaux coralliens.

Dans le cas des Maldives, les terres sont presque toutes propriété de l'Etat, seules 5 % d'entre elles appartenant à des personnes privées qui ont eu cette jouissance par un décret royal, connu sous le terme de « waqf » (Ministry of Construction and Public Works, 1999b). Ceci est un fait récent puisque ce n'est qu'en 1995 que le président M.A. Gayoom a institué cette loi. L'évolution historique des droits alors autour de la loi dite « des cocotiers » (Guébourg J.-L., 1999) qui attribuait la terre à celui qui la mettait en valeur. En 1972, le gouvernement divise les terres émergées en trois groupes : les îles issues de la coutume, les îles qui sont la propriété du gouvernement et les îles qui dépendent de *waqf*. Sur les îles gouvernementales, on trouve les *goathi* qui correspondent à de petites parcelles de terres attribuées par l'Etat à chaque locataire résidant depuis plus de six ans.

7.2.2. La structure foncière

La société tuvaluane est faite de codes sociaux auxquels il ne faut pas déroger. Il s'agit d'une véritable communauté qui s'organise autour de la terre avec des codifications précises nécessaires car, comme le signale J.-P. Doumenge (1984), « plus une chefferie est stratifiée, plus l'utilisation du sol se doit d'être planifiée ».

Il existe au sein de la société tuvaluane deux grandes catégories de familles possédant des terres. Les premières sont regroupées sous le nom de *Vakaluga* qui définit les individus qui sont propriétaires de plusieurs parcelles de terres et de plusieurs trous de *pulaka*⁶⁵. Précisons que le *pulaka* est l'élément le plus représentatif de la richesse des terres d'un propriétaire car les potentialités agro-pédologiques sont, sur un atoll, très limitées (Doumenge J.-P., 1984) et que ce tubercule ne peut être récolté qu'au bout de trois ans. Initialement, sa culture se pratiquait en panier. A nombre équivalent, la possession de *pulaka* est beaucoup plus importante socialement que celle du cocotier. Cela vient du fait que cette racine demande plus d'efforts au propriétaire pour sa mise en valeur. Ces gros propriétaires fonciers qui se distinguent des petits propriétaires appelés des *vakalalo*, bénéficient d'une plus grande influence au sein des conseils insulaires puisque, sur chaque île, un conseil de chefs⁶⁶ est dirigé par les personnages les plus importants de la hiérarchie tuvaluane.

Une nouvelle donne est venue se greffer à la domination des propriétaires terriens, il s'agit du nombre de porcs possédés par une famille. Cette possession est fondée sur une capitalisation agricole d'origine animale, comme ce qui se pratique dans les îles Salomon ou les Vanuatu (Doumenge J.-P., 1984).

Une seconde division s'opère entre la terre appartenant aux différentes familles et la terre communautaire, qui est distribuée par les chefs aux membres des différentes communautés et pour les générations futures.

Les droits à la terre pour une famille viennent directement par filiation : ce sont les enfants, plus particulièrement les fils, qui auront la jouissance des terres appartenant aux ancêtres. Comme dans de nombreuses îles polynésiennes, « si l'appropriation du sol est le fait de lignages, l'utilisation de la terre est effectuée par des familles étendues, groupes domestiques restreints composés d'un couple de référence et de sa descendance sur deux, voire trois générations » (Doumenge J.-P., 1984).

Il existe trois structures foncières majeures :

1 - *Kaitasi* : cette terre correspond à la terre d'une famille au sens large. Ce terme signifie littéralement « manger ensemble ». L'attribution de cette terre est contrôlée par un sage⁶⁷. Les membres de la famille pourront utiliser cette terre commune aussi souvent qu'ils le souhaitent et

⁶⁵ Le *pulaka* est une racine, un tubercule qui a été importé par les immigrants de Wallis et Futuna venus s'installer à Funafuti au XIX^e siècle.

⁶⁶ *Fono o Alik*

⁶⁷ *Toeina*

pourront la louer dans certains cas (Government of Tuvalu et Tourism Council of the South Pacific, 1992).

2 – *Vaevae* ou *Vaevaega o manafa* : il s'agit d'une terre initialement familiale, de type *kaitasi*, gérée par des propriétaires individuels. Cette terre a connu la division, le partage lors d'une succession, du fait généralement d'une dispute parmi les descendants. Comme le *kaitasi*, le *vaevae* peut être loué par la famille.

3 – *Fakangamua* ou *Manafa Fakangamua* : il s'agit d'une terre communautaire que l'on trouve uniquement sur les îles de Funafuti et Vaitupu. Ces parcelles sont rares mais leur utilisation peut être de deux types. Un individu sans terre et affamé pourra prélever sur place des denrées alimentaires (cocotiers, pandanus, pulaka...) après autorisation des chefs de famille. En compensation, il sera redevable à la communauté (argent, travail de la terre...). Dans le second cas, il pourra consommer sur place les produits issus de ces parcelles, s'il est affamé, mais ne disposera pas du droit de déplacer les produits en dehors de la dite parcelle. Ce concept va à l'encontre de la location.

C'est au sein des *kaitasi* ou des *vaevae* que l'on pourra effectuer des locations. Il existe trois types de locations qui se différencient, de façon très mineure, suivant les taxes à la production ou les taxes à l'entretien du sol. Les locations sont faites pour une période maximale de 99 ans, bien que désormais les baux peuvent osciller de 25 ans à 75 ans. D'après l'article 33 de la loi de 1978 relative aux terres tuvaluanes (Government of Tuvalu, 1978b), ces locations doivent concerner des parcelles et/ou des îles qui ne doivent pas dépasser quatre hectares. Ces locations concernent des établissements gouvernementaux, des églises, des bureaux... Il n'y a jamais de locations pour des personnes privées du fait qu'entre elles se pratique l'échange des terres.

Toutefois, même si la société tuvaluane est fondée sur la complémentarité, l'égalité et la réciprocité des services, comme dans de nombreuses îles du Pacifique, aucun groupe n'accepte jamais d'être totalement inféodé et cela de manière définitive à un autre groupe (Doumenge J-P., 1984).

Depuis la fin de l'exploitation de la mine de phosphate de l'île de Nauru, cette pratique de location est devenue presque obsolète. Seul, le départ des hommes célibataires pour de longues campagnes maritimes vers l'Europe permet cette pratique. En effet, les personnes travaillant à l'étranger sont des bailleurs importants car ils préfèrent louer leurs terres au gouvernement que de les laisser à l'abandon, permettant ainsi de conserver un bien pour leur future progéniture. Il s'est avéré qu'une longue absence pouvait remettre en cause un titre de propriété, notamment sur l'île de Fongafale. Non occupées, les terres sont squattées par des insulaires sans terre. La coutume a établi qu'une absence de deux ans remet en cause le titre de propriété pour cet atoll, elle est de quinze ans pour les huit autres îles. Dans les autres îles de l'archipel, un système d'enregistrement a été instauré lors de l'absence d'un propriétaire. En effet, durant tout le temps de son absence, une famille s'installe sur les terres, mais doit impérativement la lui restituer une fois qu'il est revenu. Une autre solution consiste à

effectuer une surveillance par un membre de sa famille ou par une personne inconnue, notamment si le propriétaire n'est pas originaire de l'île.

Il existe également des terres publiques situées dans l'ensemble de l'archipel tuvaluan. Elles regroupent l'espace littoral, le rivage et les routes. Ainsi, sur le domaine public côtier, on peut pratiquer la pêche, on peut se déplacer librement dans l'espace, mais on ne peut en aucun cas prélever du sable, des galets, du corail (cf. Chapitre 8). Le produit actuel de ces terres est principalement utilisé pour les taxes locales et les fêtes communautaires, mais il peut être partagé entre les différents habitants d'une île. Elles représentent une surface d'environ 2 % pour Nanumanga, 3 % à Nukufetau et un peu moins de 5 % sur les autres atolls de l'archipel, à l'exception de Funafuti.

En effet, la proportion est beaucoup plus importante pour cet atoll car il est le seul à posséder une route goudronnée, des bâtiments étatiques, un aéroport... Pour l'ensemble de ces locations, l'Etat paie un bail, mais également une somme compensatoire en raison des pertes qui sont occasionnées au bailleur sur les récoltes de *pulaka*, les noix de cocos, les fruits à pain, les *pandanus*...

A Fongafale, par exemple, le terrain sur lequel se trouve la piste d'aviation a été loué en 1983 à différents propriétaires pour une période de 25 ans. Dans cette même île, la localisation des habitats nous renseigne sur le rang social de la population, à quelques exceptions près. Ainsi, la population vivant dans les « *borrow pits* » correspond aux basses couches de la société. Dans la partie centrale de l'île réside la classe moyenne, tandis que la classe la plus aisée se regroupe sur la façade lagunaire de Vaiaku.

Aux Maldives, il existe plusieurs classes dans la société au sein desquelles se retrouve le nom d'anciennes castes, témoignages du monde Indien qui a été influent il y a de cela plusieurs siècles.

Au sommet de la pyramide sociale, il y a les *Beyfulus* qui portent souvent le patronyme Didi ou Sayed pour ceux qui sont directement apparentés au prophète. La classe moyenne, les *Beykalun*, regroupe avec l'ancienne caste des *Maniku*, toutes les personnes lettrées et d'un certain niveau de vie. Enfin, le reste de la population forme la classe des *Adaigemühun*.

La date de 1972 marque le passage d'un bien appartenant à une seule personne à un bien pouvant être loué à plusieurs personnes. A cette époque, les Maldiviens deviennent propriétaires pour des périodes déterminées. Ce procédé avait comme seul but, d'après le gouvernement, de ressouder les habitants après le départ des Britanniques de l'archipel en 1976. Pour l'appât de l'argent, les Maldiviens, devenus ainsi propriétaires, ont vendu une partie des terres aux étrangers, notamment pour le développement touristique. L'enrichissement de certains Maldiviens a été, durant cette période, très important. Le président M.A. Gayoom a souhaité alors stopper cette surenchère afin de contrôler systématiquement l'ensemble du foncier. Cette récupération des terres a été effective pour les terres maldiviennes mais cela n'a pas été possible pour les terres appartenant aux étrangers. C'est pour cette

raison que l'Etat a fixé la date butoir de 2016 pour récupérer la totalité des îles de l'archipel, avec l'instauration d'une compensation financière pour les étrangers.

En effet, les terres sont en théorie propriété de l'Etat mais toutes les parcelles d'une île ont un propriétaire. Actuellement, personne n'a le droit de les vendre ou de les acheter, exception faite de certaines îles touristiques qui peuvent changer de propriétaire comme, par exemple, l'île de Rihiveli (atoll de Malé sud) dont, en 1996, l'ancien propriétaire de nationalité française l'a revendue à un Singaporien. Ce dernier doit payer à l'Etat une redevance annuelle de 200 000 \$US.

Les îles sont acquises par un bail gratuit pour les Maldiviens, auprès du ministère compétent (*Ministry of Provincial Affairs*), mais payant pour un étranger, si celui-ci a ouvert sa structure hôtelière après 1995. Pour les Maldiviens, une fois la famille installée sur la parcelle, seule la succession après un décès va créer des difficultés.

Pour l'île capitale, le problème devient plus important, car le partage des terres est quasiment impossible. Deux solutions peuvent être alors envisagées. Soit la maison familiale est compartimentée entre les différents membres de la famille, chacun vivant alors dans des pièces cloisonnées (exemple : pour une mère et son fils, il y aura une pièce de couchage et un petit salon, la cuisine restant commune à l'ensemble de la famille). Soit la terre est partagée en hauteur. Il n'est pas rare que les parents vivent au rez-de-chaussée, un des enfants avec sa famille au premier étage, le second au-dessus. La construction est artisanale mais autorisée. Le manque de place est la raison du développement d'immeubles sur plusieurs étages. A défaut d'un développement en largeur, l'île monte en hauteur.

Si le gouvernement souhaite des terres pour de nouveaux projets immobiliers, comme sur Malé, il fera jouer son droit de préemption et indemniser les anciens usagers. Toutefois, l'utilisation multiple du sol ou la multipropriété rend cette acquisition extrêmement compliquée et peut retarder les travaux de plusieurs années.

Dans les îles plus éloignées, la transaction est différente. Prenons l'exemple de l'île de Velidhoo, qui est une des îles les plus peuplées de l'atoll de Noonu. C'est le comité de village qui a toute compétence pour attribuer une terre à une personne souhaitant s'installer sur l'île. Ainsi, une île pourra être louée à une personne privée, mais pour cela, le comité d'atoll devra verser au ministère, à Malé, environ 1 500 Rf/an, et récoltera auprès de l'intéressé 1 500 Rf/mois. A une autre échelle, l'île de Gan, dans l'atoll de Seenu, s'est louée aux Britanniques 2 000 £/an en 1957, puis 100 000 £/an lors du renouvellement du bail en 1960.

Les terres insulaires n'auront pas le même gestionnaire s'il s'agit d'une île habitée, inhabitée ou touristique. Ainsi, le ministère de l'Administration des Atolls gère l'ensemble des îles habitées et intervient lorsque « la dégradation des atolls incombe aux activités anthropiques », alors que celui des Affaires Provinciales administre les baux de l'Etat. Seules, les îles habitées de Malé, Vilingili et Hulhumalé sont sous l'autorité du ministère des Affaires Intérieures, du Logement et de l'Environnement. Le ministère des pêches, de l'Agriculture et des Ressources marines (MFAMR) s'occupe « des îles inhabitées, des bancs de sable, émergés ou immergés, et des récifs » et les donne en

gestion auprès de personnes privées. Ainsi, en théorie, une île peut être acquise pour une période de dix ans alors que la pratique montre qu'une île reste dans une famille sur plusieurs générations. Le bail est payant et il est calculé *au prorata* du nombre de cocotiers existant sur l'île, chaque cocotier rapportant à l'Etat 0,0792 €. Quant au ministère du Tourisme, il intervient en dernière instance lorsque le MFAMR lui a accordé la gestion d'une île à vocation touristique. Bien que, généralement, le développement touristique d'un *resort* se fait à partir d'une île inhabitée, il y a eu quelques exceptions comme les îles de Giraavaru, dans l'atoll de Malé nord, et Kuramathi dans l'atoll d'Ari. Dans ce cas, c'est le ministère des Affaires Provinciales qui est compétent pour accorder un bail et gérer l'évolution de l'île avec le ministère du Tourisme. La location initiale de la terre ne coûte presque rien (76 €/mois). Ce sont les différents interlocuteurs jusqu'à la construction de l'hôtel qui vont faire monter les prix. Le principe de la location se fait au plus offrant et à celui qui possède le meilleur projet, mais c'est le ministère du Tourisme qui désigne en dernière instance la personne de son choix.

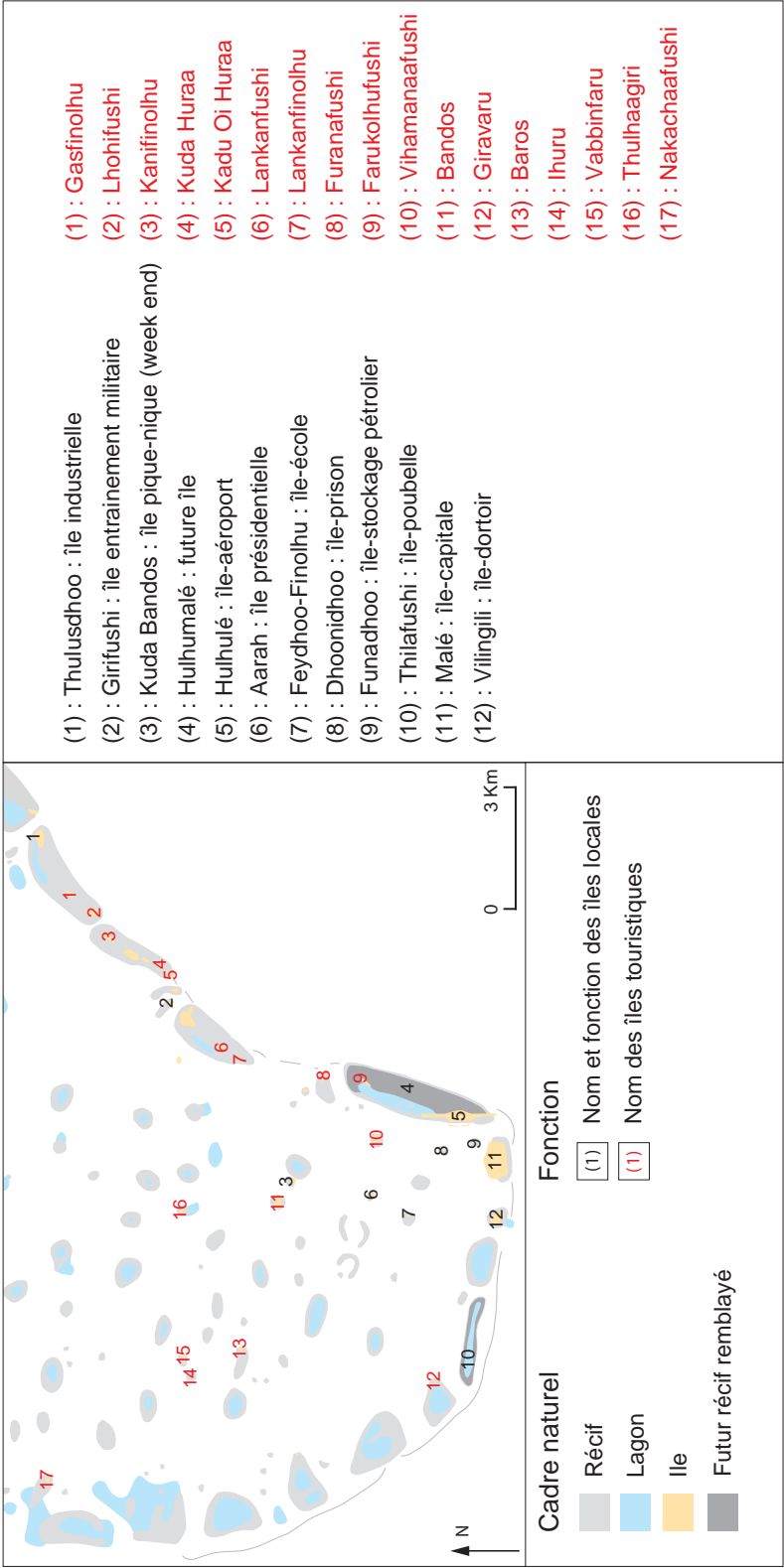
Un problème se pose également en terme de valeur foncière notamment lorsque l'on souhaite acquérir une île pour la construction. Il faut établir une sous-location puis faire une demande aux différents ministères compétents.

7.2.2.1. Cas pratique : la monofonctionnalité insulaire, spécificité maldivienne

Au voisinage de la capitale, l'organisation du territoire est particulière puisque chaque île a une fonction et une seule. Il ne s'agit pas d'une mesure compensatoire vis-à-vis de la capitale surpeuplée, qui a encouragé cette spécialisation, mais d'une organisation assez ancienne. Dans son ouvrage, F. Pyrard de Laval (1998) décrit la spécificité de certaines îles et laisse transparaître un fonctionnement particulier du territoire dès le début du XVII^e siècle. Il y avait les îles-vacances pour le sultan vivant sur Malé, des îles-exils, des îles-prisons... Depuis, cette spécificité s'est amplement confirmée lorsque la capitale a dû redistribuer ses compétences et que l'Etat a souhaité développer le secteur touristique (cf. Figure 155). Malé est alors « une agglomération qui se répand sur plusieurs îles » (Gay J-C., 2000). On trouve autour d'elle les îles-aéroports, l'île-présidentielle, l'île-caserne, l'île-école, l'île-stockage pétrolier, l'île-poubelle, l'île-industrielle, l'île-prison et plusieurs îles-hôtels (Cf. Figure 155 - annexe).

Si, à l'échelle de l'archipel, cette monospécificité est moins affirmée, elle est toutefois présente. Pour l'étudier, nous avons travaillé en collaboration avec le ministère de l'Administration des atolls afin de définir pour chaque île locale la ou les fonctions majeures.

Figure 155 : Exemples de la fonctionnalité insulaire dans l'atoll de Kaafu, Maldives



7.2.3. Vers une nouvelle gestion des territoires insulaires

7.2.3.1. La nouvelle organisation étatique du territoire tuvaluan

L'organisation étatique des Tuvalu s'articule autour de plans de développement de cinq années dont le dernier date de 1998 (Government of Tuvalu, 1995). Depuis, les grands programmes étatiques sont toujours issus de ce plan, seules les visions évoluent et peuvent changer à chaque réunion annuelle. Il n'y a plus aucune politique ministérielle menée sur le long terme, hormis certaines mesures spécifiques comme, par exemple, celle de favoriser le désenclavement des huit autres îles de l'archipel par la mise en place d'une nouvelle liaison entre elles.

Depuis 2001, le gouvernement souhaite redistribuer la population de Fongafale sur sa partie centrale afin de limiter la pression. C'est dans ce but que la route a été créée et que des portions de l'île ont été totalement déforestées en vue de l'établissement de nouvelles habitations (cf. Figure 156). Comme nous l'avions imaginé, la route a permis de déconcentrer les habitations pour des personnes nouvellement arrivées ou déjà présentes sur l'île. Ainsi, au lieu de motiver une décentralisation des activités vers les îles externes, le gouvernement accentue la pression sur Fongafale et l'exode insulaire des autres îles. Ce mouvement est facilité par l'aptitude à la transplantation des Tuvaluans, qui est une caractéristique des populations polynésiennes⁶⁸.

La construction du bâtiment gouvernemental n'améliore pas cette situation. D'après les premières réactions, de nouveaux migrants arrivent des autres îles pour y travailler.

Cette nouvelle organisation du territoire semble privilégier l'étalement sur Fongafale comme cela s'est fait à Tarawa dès les années 1960 où la population s'est installée sur plus de 30 kilomètres, de Betio à Bonriki (Guilcher A., 1967).

7.2.3.2. Mise en place d'une politique transmigrationnaire dans l'archipel maldivien

C'est un des objectifs principaux du dernier plan étatique de développement (Republic of Maldives Ministry of Planning and National Development, 2002) initié préalablement lors du Projet de Développement Régional pour la période 2000-2002. Il s'agit de limiter l'attraction de Malé, qui concentre plus du quart de la population totale, en redistribuant plus équitablement les compétences dans deux grandes régions de l'archipel, la région nord qui concentre les atolls de Haa Alif, Haa Dhaal et Shaviyani et la région sud avec les atolls de Gaaf Alif, Gaaf Dhaal, Gnaviyani et Seenu. Si le projet actuel ne peut s'attacher à développer que deux provinces, afin de limiter les problèmes financiers et

⁶⁸ Non micronésiennes comme l'a écrit Doumenge F. (1966) - *L'Homme dans le Pacifique Sud : étude géographique*. Publications de la Société des Océanistes, Musée de l'Homme, vol. 19, Paris, 633 p.

Figure 156 : Politiques d'aménagements de l'espace : quelques exemples



Ile de Malé (Maldives) : la surpopulation et l'exiguïté de l'île impliquent de chercher des solutions verticales



Ile artificielle d'Hulhumalé (Maldives) :



Ile de Fongafale (Tuvalu) : déforestation d'une partie de la bordure océanique en vue d'une implantation humaine



Ile de Fongafale (Tuvalu) : construction de la route et élargissement du passage entre Fongafale et Tengako

d'organisation étatique, à terme le gouvernement souhaite organiser l'archipel suivant cinq provinces⁶⁹ de développement.

Il s'agit d'un rééquilibrage spatial de l'archipel avec un développement initial à partir de neuf îles dans les atolls septentrionaux et de quatre îles dans les atolls méridionaux pour arriver à terme à regrouper la population des 201 îles habitées sur seulement 80 d'entre elles. Ainsi, il est prévu que pour les îles ayant moins de 300 habitants, la population soit déplacée vers des îles plus importantes. Les premiers mouvements de population ont débuté courant 2001 dans l'atoll de Haa Dhaal où les habitants des îles de Faridhoo (230 habitants) et de Hodaidhoo (169 habitants) ont été déplacés sur l'île d'Hanimadhoo (1232 habitants). Ce mouvement de population est la réplique d'un projet initié en 1968 (cf. Figures 157 et 158, 159, 160 - annexe), lui-même inspiré par des déplacements historiques institués dès le XVII^e siècle (cf. Figures 162 et 161, 163, 164 - annexe). Il s'agissait alors de déplacer la population des îles peu anthropisées, théoriquement ayant une population inférieure à 50 habitants, sur des îles plus densément peuplées. A ce titre, les îles de Faridhoo (115 habitants) et d'Hodaidhoo (99 habitants) avaient vu leur population migrer sur l'île d'Hanimadhoo, respectivement en juillet 1971 et en octobre 1968. Ce projet a été définitivement abandonné en 1975 après que les populations insulaires sont retournées dans leurs îles d'origine. A la différence du programme de 1968 qui utilisait des îles habitées, sur les 80 îles choisies pour le projet actuel, certaines ont été aménagées pour l'occasion comme l'île inhabitée de Milandhoo dans l'atoll de Shaviyani, d'autres sont poldérisées comme l'île de Kulhudhuffushi dans l'atoll de Haa Dhaal, et certaines vont être reliées entre elles par un remblai comme les îles de Muli et de Naalaafushi dans l'atoll de Meemu.

Le regroupement des populations insulaires permettra de réduire les dépenses publiques : aux Maldives, le coût pour maintenir ou assurer les services socio-économiques indispensables est quatre à cinq fois plus élevé que dans les pays développés ou dans d'autres pays insulaires (Republic of Maldives Ministry of Planning and National Development, 2002). Par le regroupement de la population, le gouvernement souhaite également exercer un contrôle de la croissance démographique par le biais de campagnes de contraception. « Il s'agit de faire comprendre aux familles qu'un nombre moindre d'enfants permettrait une meilleure éducation »⁷⁰ (notons que les femmes maldiviennes des îles locales peuvent avoir jusqu'à six enfants). Bien que depuis trois décennies des efforts aient été faits en ce sens (Nagase T. *et al.*, 2003), la difficulté de diffusion de l'information entre Malé et les autres îles, ainsi que la force du sentiment religieux condamnant les moyens de contraception, rendent difficile l'application des mesures envisagées.

Ce projet n'est pas, d'après le ministère du Plan et du Développement National, un projet autoritaire imposé par le gouvernement comme celui de 1968. Le choix de l'exode insulaire revient à la population maldivienne ; chaque habitant pourra choisir de quitter ou non son île, le gouvernement lui assurant le financement de sa nouvelle habitation à hauteur de 90 000 Rf par foyer (environ 8 071

⁶⁹ Nord, Centre-Nord, Centre, Centre-Sud, Sud

⁷⁰ Entretien avec Mr. Hunaif – Ministère du Plan et du Développement National

Figure 157 : Nouvelle politique transmigration dans l'archipel des Maldives

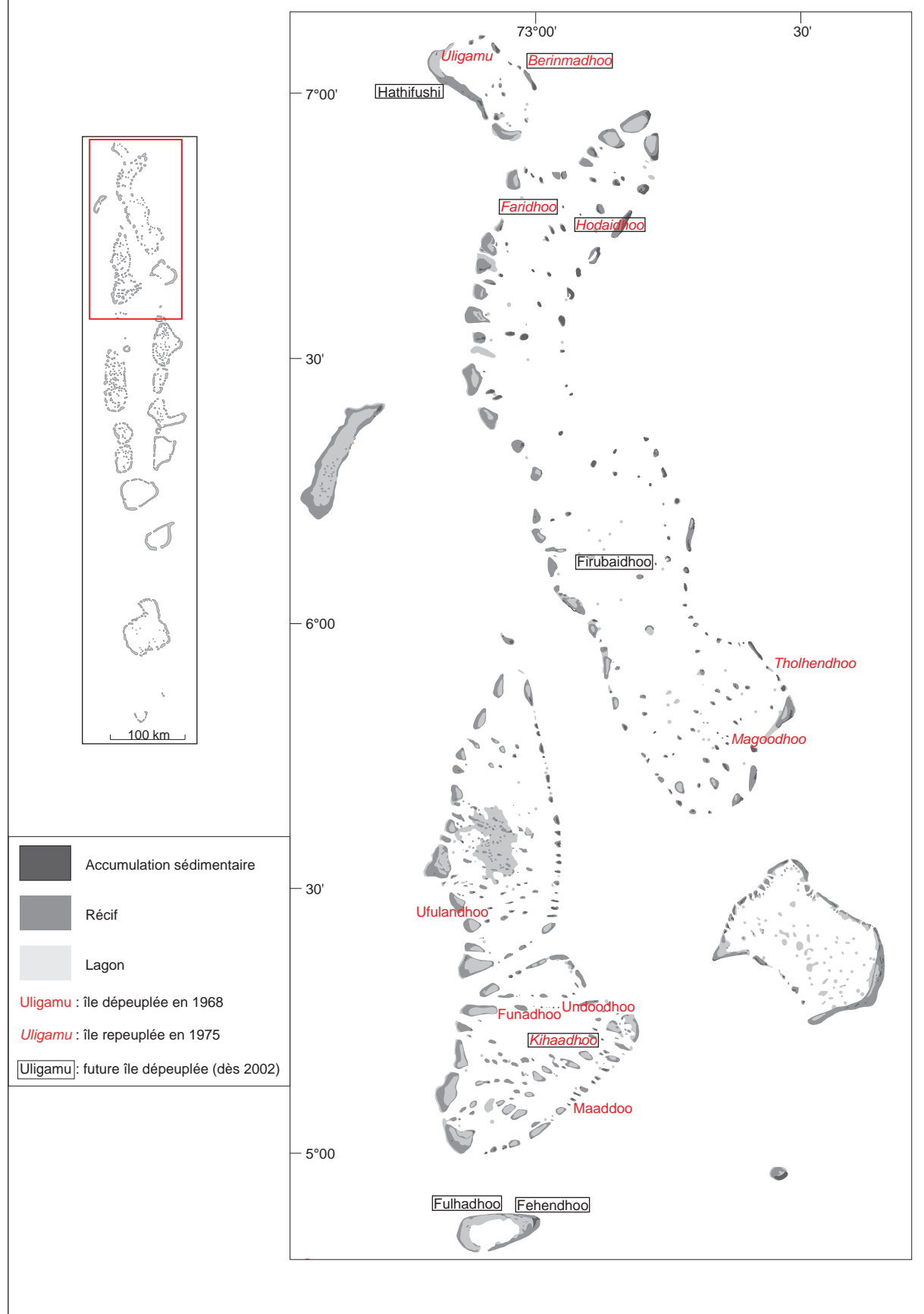
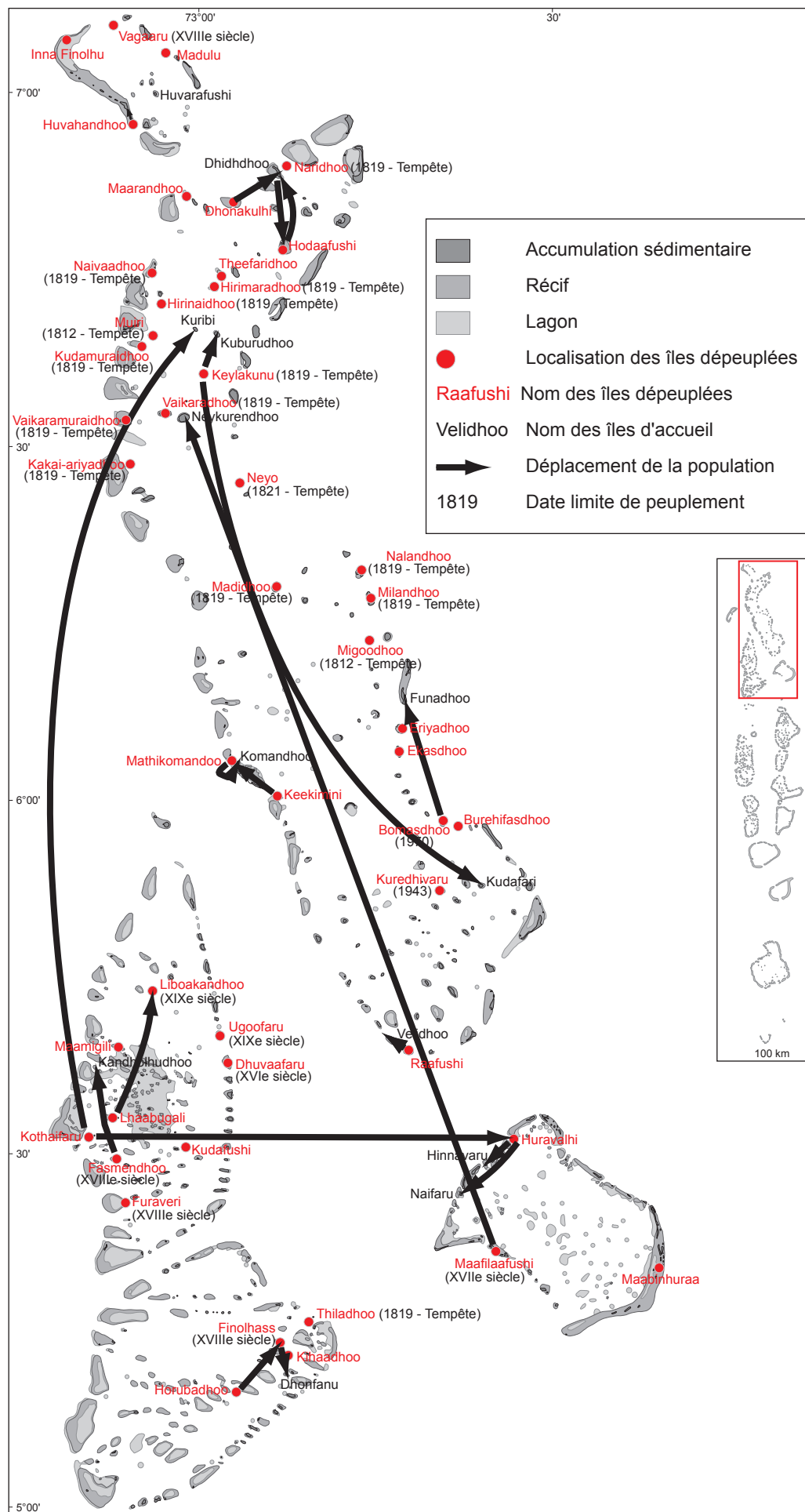


Figure 162 : Les migrations historiques de populations dans l'archipel des Maldives



euros). Quand on connaît l'attachement des îliens envers leur terre, cette mesure qui se veut libre de toute contrainte suscite une certaine perplexité.

En relation avec le Premier Projet de Développement Régional, un programme de développement insulaire⁷¹ a été mis en place pour treize îles localisées dans les provinces nord et sud. Le développement économique du nord (cf. Figure 165) concerne les îles de Kumundhoo, Kulhudhuffushi, Nohivaramu, Nohivaranfaru, Hanimadhoo, Baarah, Filladhoo, Kelaa, et Dhidhdhoo situées dans les atolls de Haa Alif et Haa Dhaal. Ainsi, ces neuf îles vont être reliées entre elles par un système de ferries, à travers des liaisons régulières, afin d'assurer rapidement l'acheminement des enfants vers l'école mais également le transport vers l'hôpital régional. En effet, c'est la santé et l'éducation qui ont été choisies comme domaines de développement par le gouvernement, car rares sont les atolls qui abritent des écoles ou des hôpitaux, à l'exception des atolls de Kaafu et de Seenu.

Si des transports inter-îles sont institués il faudra imposer une baisse de leurs coûts, au regard de ce qui est pratiqué à Vilingili et Hulhulé. Actuellement, un aller en dhoni depuis Malé coûte 10 Rf pour rejoindre Hulhulé, certainement plus pour relier la future Hulhumalé, et 5 RF pour Vilingili, ce qui est excessif pour un Maldivien des couches moyenne ou basse de la société.

En liaison avec ces politiques de développement, le ministère des Transports souhaite implanter deux ports commerciaux dans les régions concernées. Ils permettraient de désengorger le trafic de la capitale et de donner une plus grande légitimité au choix étatique. Ainsi, l'importation des produits et des biens se ferait directement depuis le Sri Lanka vers ces deux ports, qui seront :

- pour la province nord, le port de l'île de Kulhudhuffushi ;
- pour le sud, celui de l'île d'Hithaadhoo.

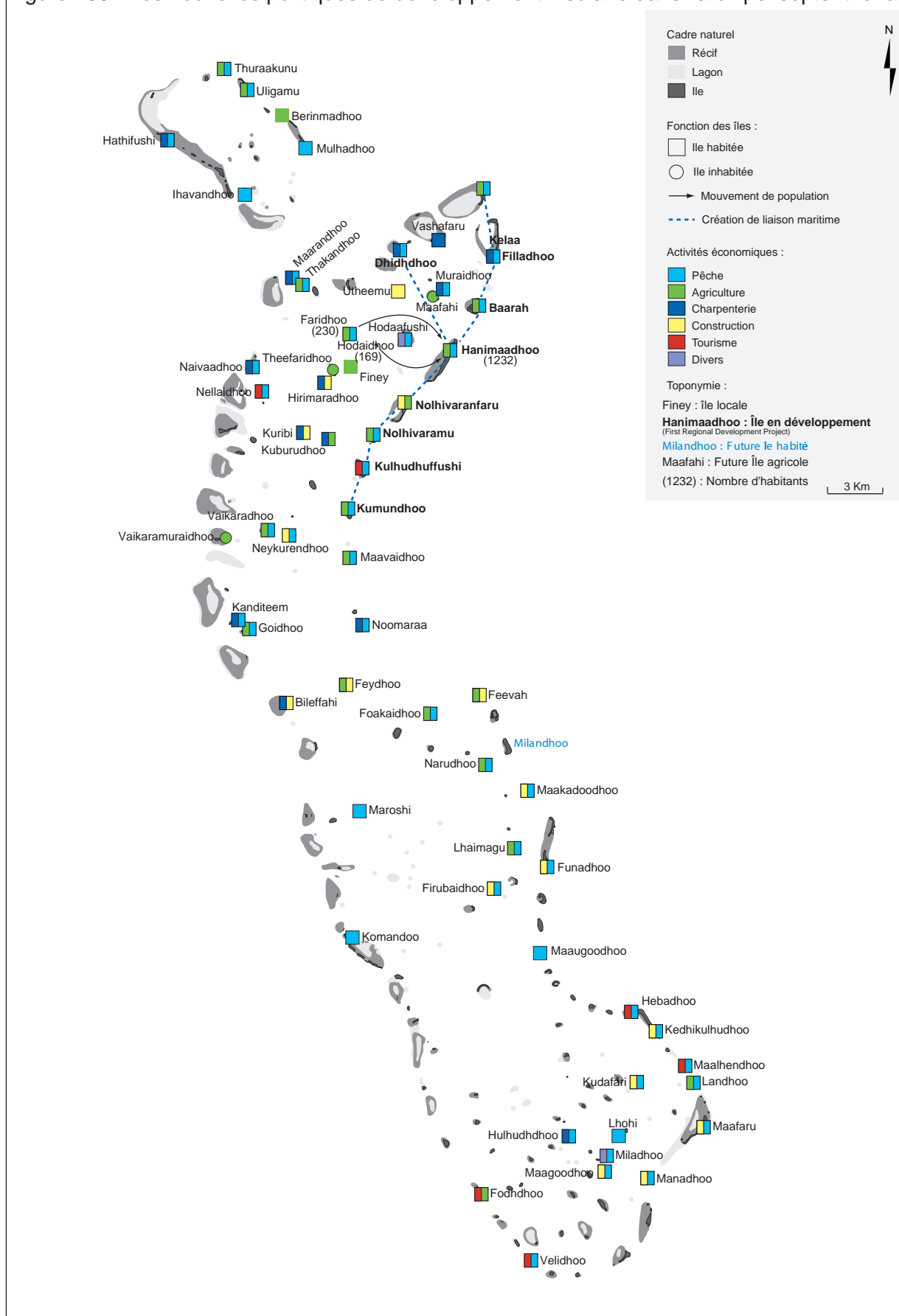
Leur financement serait assuré à 82 % par la Banque Asiatique de Développement et à 18 % par le gouvernement maldivien soutenu par la Banque Islamique de Développement.

Le projet de développement méridional (cf. Figure 166 - annexe) concerne exclusivement l'atoll de Seenu, bien qu'il soit considéré, et cela à juste titre, comme le second pôle étatique, du fait de son histoire. Il s'agit de mettre en avant de nouveaux secteurs économiques (cf. Chapitre 7.3), de réhabiliter les espaces littoraux en vue d'aménagements futurs, et de développer une liaison maritime régulière avec l'atoll de Gnaviyani. Pour cela, les quatre îles localisées sur la bordure occidentale de l'atoll de Seenu, qui avaient été reliées entre elles par des *causeways*⁷² durant la Seconde Guerre mondiale, ont subi des modifications. Les travaux, qui ont débuté en décembre 2002 et se sont achevés cette année, ont permis de remplacer les *causeways* par des ponts assurant ainsi le passage des eaux entre le lagon et le platier externe. Les ingénieurs souhaitaient recréer, grâce à un effet de chasse, un transit sédimentaire normal entre l'océan et le lagon et éviter que ce dernier ne s'ensable. Il est ensuite prévu que l'atoll soit équipé d'un port et d'un polder sur le rivage lagonaire de l'île d'Hithaadhoo afin

⁷¹ *Population and Development Consolidation Program*

⁷² Cordons littoraux artificiels

Figure 165 : Les nouvelles politiques de développement insulaire dans l'archipel septentrional



de le conforter dans son rôle de second pôle économique de l'archipel. En complément du port et des ponts, une route d'environ 10,5 km a été créée entre les îles de Gan et d'Hithaadhoo, au plus proche du lagon, afin de faciliter les échanges entre les différentes communautés insulaires.

Si l'île d'Hanimadhoo possède un aéroport assurant des liaisons domestiques entre la capitale et la province nord, l'atoll de Seenu souhaite redynamiser son aéroport, afin de lui assurer un rôle international d'ici la fin l'année.

Le souhait du ministère du Développement est, à terme, l'implantation d'un aéroport à deux heures maximales de trajet de toutes les îles locales importantes. Pour cela, l'Etat a établi la liste des premiers atolls qui bénéficieront de ces nouveaux aménagements : ce sont les atolls de Haa Dhaal, Laamu, Gaaf Alif, Ghaaf Dhaal.

La création de tels pôles économiques devrait changer la répartition de la population et permettre aux éléments masculins, fort nombreux sur Malé et sur les grands espaces touristiques comme les atolls de Kaafu et d'Ari, de revenir travailler dans leurs atolls d'origine, à proximité de leurs familles. A travers ce Premier Projet de Développement Régional, l'Etat souhaite donc améliorer le confort de la population, indirectement comme nous venons de le voir ou directement par la mise en place de lignes électriques, la gestion des déchets, le traitement des eaux usées et le stockage des eaux de pluie... L'électrification des îles est assez aléatoire car, sur les neuf îles de la province nord, trois bénéficient de courant toute la journée, quatre ont du courant durant 12 h et une n'en a pas du tout. Pour remédier à cette disparité et intervenir sur d'autres atolls plus défavorisés, un programme énergétique a été établi en partenariat avec le gouvernement maldivien et l'UNDP pour la mise en place de lignes électriques sur environ 40 îles des atolls de Vaavu et de Shaviyani, pour un coût total estimé à 8 millions \$ US. Si certains de ces aménagements sont en cours de réalisation, d'autres sont encore à l'état de projets, et semblent assez disproportionnés au regard du développement local des atolls et des moyens financiers dont ils disposent.

Une seconde raison a été invoquée par le gouvernement pour expliquer le regroupement de la population sur des sites précis. Il s'agit de combattre le plus efficacement possible l'élévation future du niveau de la mer en implantant des protections tout autour des îles. La concentration de la population sur certaines îles implique de fait une protection moins onéreuse pour le gouvernement.

Si la volonté du gouvernement semble être de vouloir assurer une meilleure gestion de son territoire, nous pouvons nous interroger sur la légitimité d'un tel projet et redouter à terme un contrôle gouvernemental quasi-total de l'archipel et de sa population, préoccupation que partagent certains Maldiviens. L'élévation du niveau de la mer et le réchauffement climatique deviendraient alors les causes des mouvements migratoires.

Le Premier Projet Régional de Développement avec la création des cinq grandes provinces ne laisse pas d'interroger lorsque l'on sait que le but du ministère du Plan et du Développement National est à

terme la création de « cinq Malé ». Par ce biais, le gouvernement va augmenter non seulement la pression sur quelques îles ciblées mais accentuer les disparités au sein des îles et créer des zones marginales. Nous sommes en droit de nous interroger sur le bien-fondé de cette pratique et sur sa légitimité. Ne faut-il pas y voir une mesure laissant libre cours au développement touristique ?

Quelques données peuvent également surprendre lorsque l'on compare les différents écrits ou récits de personnes travaillant au sein de ce ministère. D'après le discours officiel, 40 îles devraient être dépeuplées dans le cadre de ce programme, or seules 12 îles habitées⁷³ possèdent moins de 300 habitants. Quelles sont les 28 autres îles ? Quels atolls vont être dépeuplés ? La mise en place d'un tel projet implique des coûts importants, notamment pour un pays en développement. Le gouvernement fait donc appel à des contributions étrangères pour chaque programme de développement ou chaque aménagement. Le début du projet a été financé par la communauté européenne, à hauteur de 870 000 euros, mais est désormais cofinancé par la Banque Asiatique de Développement et la Banque Islamique de Développement⁷⁴.

7.3. Le développement touristique des îles basses

Bien que les îles basses du Pacifique ou de l'océan Indien fassent rêver les touristes occidentaux, seules les Maldives ont réussi à l'échelle des micro-Etats insulaires à s'imposer comme une destination touristique importante. Alors qu'elles accueilleraient environ 33 000 touristes en 1979 (33 124 exactement), au balbutiement de l'activité, les Tuvalu atteignaient difficilement 474 touristes. L'avantage des Maldives est leur proximité du marché européen, à seulement neuf heures d'avion en direct depuis Paris, Londres, Rome ou Vienne, et constituent les premiers archipels d'atolls coralliens réunissant les trois « S ». La morphologie particulière de cet archipel et la richesse de son biotope ont multiplié les possibilités de développement humain et le sur-développement touristique. Les Maldives sont devenues des lieux de haute valeur économique.

7.3.1. L'évolution diachronique du tourisme dans l'archipel maldivien

Malgré un premier rapport pessimiste, établi au début des années 1970, sur la potentialité du développement de l'activité touristique dans l'archipel des Maldives⁷⁵, les chiffres actuels prouvent largement le contraire puisqu'en 2003, le nombre de touristes ayant séjourné dans l'archipel était supérieur à 560 000 (cf. Figure 167). Il s'agit d'un tourisme exclusivement international (cf. Figure 168). C'est un voyageur italien⁷⁶, aidé par deux investisseurs maldiviens, qui a développé la première

⁷³ Berinmadhoo, Hathifushi, Faridhoo, Firubaidhoo, Thimadhoo, Dhiyadhoo, Fehendhoo, Fulhadhoo, Dhidhdhoo, Madifushi, Raimandhoo, Veyrah.

⁷⁴ <http://www.frdp-maldives.gov.mv>

⁷⁵ Rapport de l'UNDP –auprès de Mohamed Ali.

⁷⁶ G. Corbin

Figure 167 : Evolution du nombre de touristes dans l'archipel des Maldives de 1972 à 2003

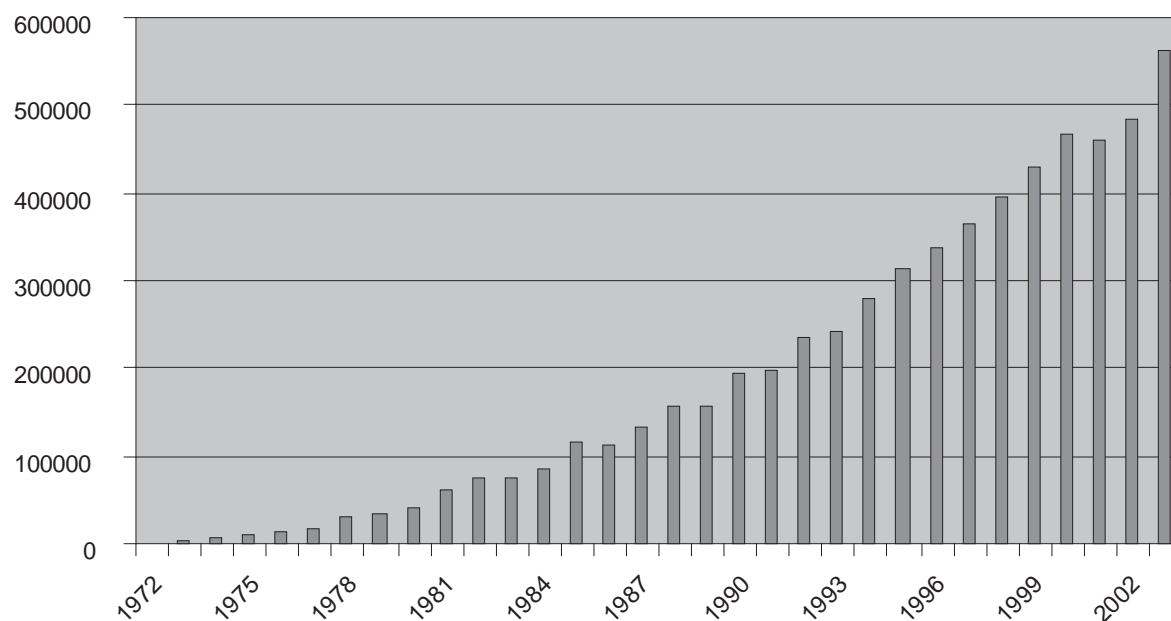
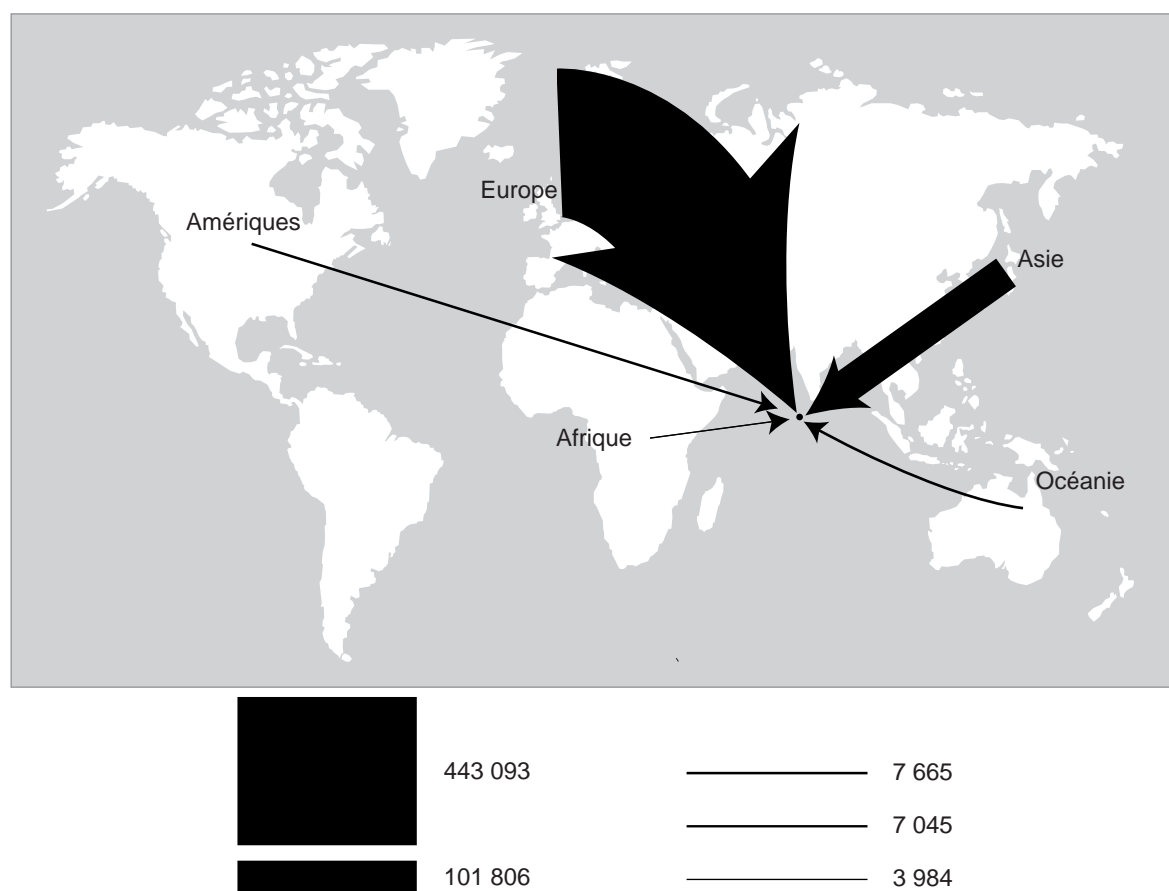


Figure 168 : Flux touristiques aux Maldives en 2003



structure hôtelière dans l'archipel en 1972 (cf. Figures 169, 170, 171, 172, 173 – annexe et 174), le *Kurumba village*. Une seule agence touristique, la CTA (Crescent Tourist Agency), dont l'un des principaux actionnaires était le Président de la République de l'époque, Ibrahim Nasir (1954-1978), contrôlait un certain nombre d'îlots voués à cette activité dans l'atoll de Malé nord comme, par exemple, l'île de Bandos « qui accueille chaque semaine une quinzaine de touristes scandinaves » (Dupuis J., 1974). A l'époque, comme nous l'a rapporté Mohamed Ali⁷⁷, les touristes devaient passer trois jours au Sri Lanka avant de pouvoir gagner l'archipel via la compagnie Air Ceylon (vol bimensuel Malé-Colombo), puis ultérieurement Air Maldives. L'effondrement du marché cinghalais du poisson séché en 1973, qui constituait le débouché de l'économie maldivienne de l'époque, incite un peu plus les Maldiviens à considérer ce nouveau secteur économique. Jusqu'en 1978, les premières structures touristiques sont nées de volontés individuelles et de capitaux majoritairement étrangers, injectés dans l'Etat grâce à une politique gouvernementale de libre circulation des capitaux. En effet, « le rapatriement illimité de fonds et la politique de taxation libérale ont attiré de nombreux investisseurs étrangers dans le secteur » (Discours du Ministre du Tourisme, Malé, 1999). Ce n'est qu'à partir de cette année là que le gouvernement, avec l'avènement au pouvoir du président actuel, M.A. Gayoom, a pris conscience de l'énorme potentialité économique que représentait l'activité touristique (Domroes M., 1999). La même année, le gouvernement crée le département du Tourisme et des Investissements Etrangers qui devient en 1988 le ministère du Tourisme. En 1979, la nouvelle équipe gouvernementale instaure une taxe de nuitées et libéralise les investissements du secteur, jusque-là contrôlés par la famille présidentielle.

Afin de dynamiser ce secteur et le rendre viable, il a fallu améliorer la desserte de l'archipel en créant l'aéroport international d'Hulhulé en 1981 (piste de 2 840 m permettant d'accueillir les avions gros porteurs), car seul un aérodrome aux capacités limitées assurait depuis 1960 la desserte du pays. C'est réellement cet aménagement qui a permis le décollage économique de l'activité dès les années 1983-1984 (Domroes M., 2001). Après les atolls de Malé, ce fut au tour de l'atoll d'Ari d'accueillir les premières structures touristiques en 1982 : *Fesdu Fun Island* et *Halaveli Holiday Village*. Cet atoll fut très activement développé : le nord jusqu'à la fin des années 1980, puis le sud de 1990 à 1997. La création de nouvelles structures touristiques, en dehors de cet espace central et de plus en plus éloigné de l'aéroport d'Hulhulé, fut rendue possible par l'avènement de nouveaux moyens de transport comme le *speedboat*⁷⁸ ou l'hydravion (cf. Figure 175). Le coût de fonctionnement de ce dernier est si important que les investisseurs ont dû créer des structures hôtelières plus importantes, dès la fin des années 1990 et début des années 2000. Il s'agit, par exemple, de *Pear Island Resort* (atoll de Raa) avec 430 lits ou les 700 lits de *Sun Island* (atoll d'Alifu), localisés respectivement à 130 km et 100 km de l'aéroport.

⁷⁷ Architecte naval français vivant dans l'archipel depuis les années 1970

⁷⁸ Hors-bord dépassant la vitesse de 30 noeuds

Figure 174 : Evolution des structures hôtelières dans l'archipel des Maldives en 2001

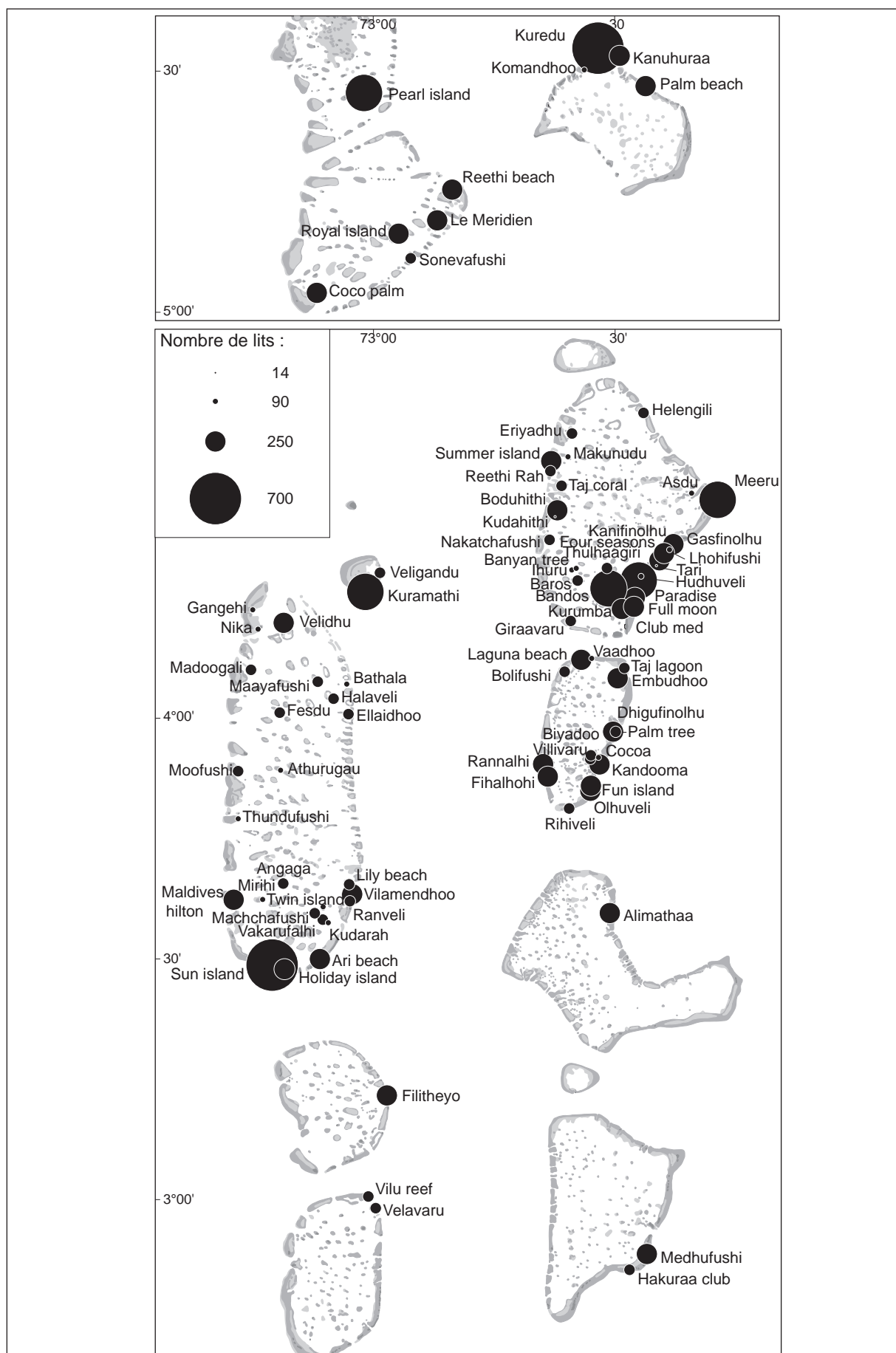
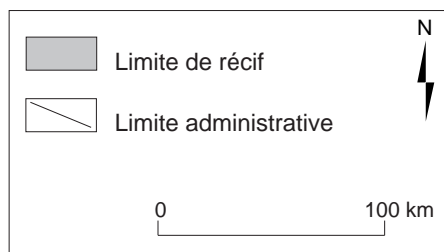
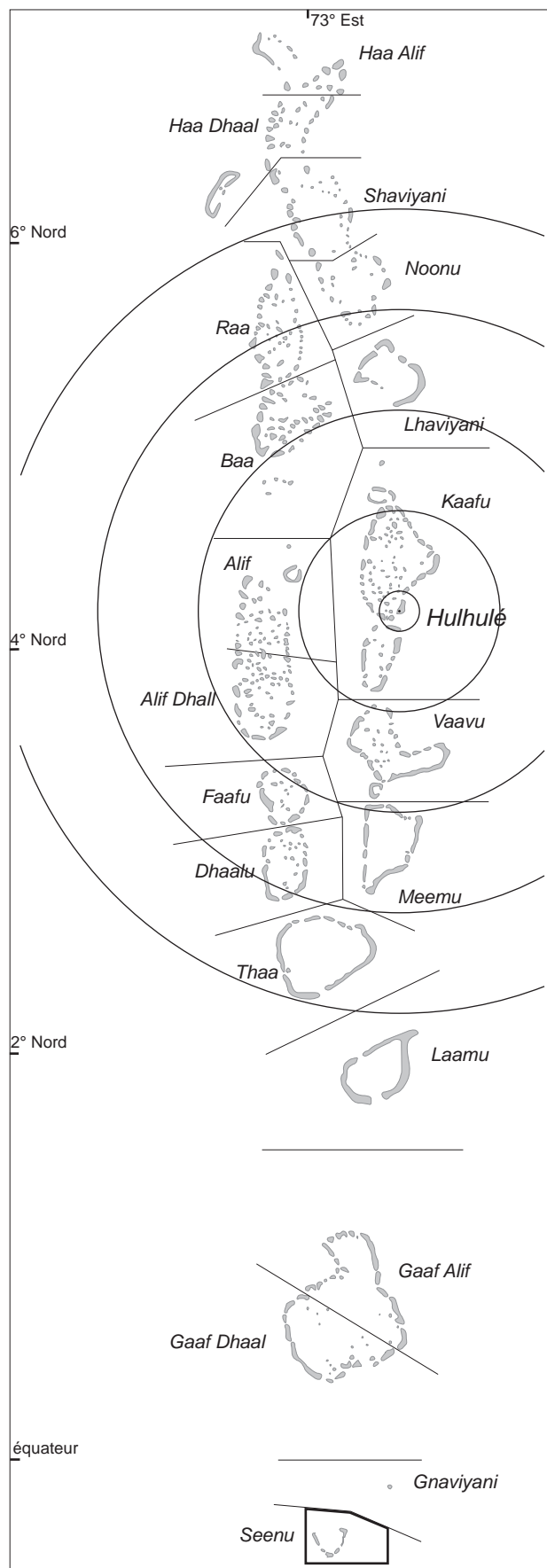
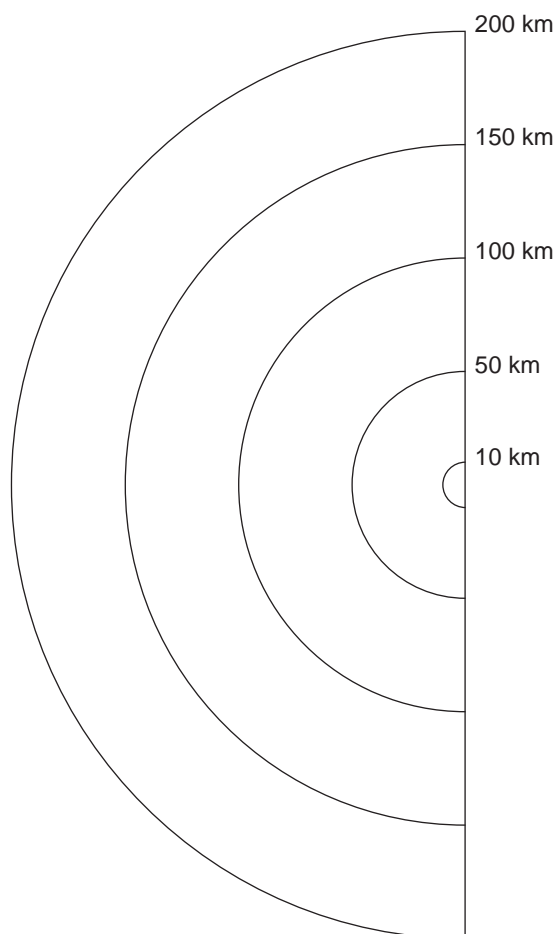


Figure 175 : Distribution radiale des principales structures hôtelières dans l'archipel des Maldives par rapport à l'aéroport d'Hulhulé



Distance à l'aéroport international d'Hulhulé :



7.3.2. Une activité planifiée...

Les limites de l'aire maldivienne de tourisme sont décidées par le gouvernement lors des différents plans étatiques qui assurent une planification de cette activité. Ainsi, en 1983, le premier plan de développement touristique est instauré pour une dizaine d'années et privilégie le développement des îles localisées à proximité de l'aéroport, à une heure maximum de bateau. Avec la mise en place de la « zone touristique », les distances s'accroissent même si l'on s'éloigne peu des atolls centraux comme Malé et Ari. Le temps de bateau s'allonge puisqu'il faut entre deux et quatre heures pour rejoindre son hôtel. L'implantation de nouvelles structures hôtelières, de plus en plus loin, contraint à la mise en place d'un service d'hydravions, *Maldivian Air Taxi*.

Le second plan touristique (1996-2005) est axé sur des règles conciliant développement économique et environnement et s'intègre parfaitement aux politiques gouvernementales établies lors du Sixième Plan de Développement (Republic of Maldives Ministry of Planning and National Development, 2002). Son objectif premier est de permettre d'accueillir, d'ici à la fin 2005, 650 000 touristes dans l'archipel, sur un espace touristique plus vaste que celui exploité jusqu'alors. Il s'agit de décentraliser les structures hôtelières, quel que soit leur type (*resort*, safari boat, croisière...) en dehors de la zone préalablement développée tout en améliorant les capacités d'accueil des précédentes structures. Ainsi, le pôle central (Malé et Ari) se verrait attribuer 2 500 lits supplémentaires, tandis que les atolls de la première couronne d'extension, c'est-à-dire à environ 150 km d'Hulhulé⁷⁹, auraient leurs capacités quintuplées. Pour cela, le plan fait mention de la construction de trente nouveaux *resorts* (Commission of the European Communities, 1995) dans cette région centrale étendue. La volonté de développer un aéroport-relais dans l'île de Fainu, atoll de Raa, laisse facilement envisager dans l'avenir l'extension du tourisme dans les atolls du nord de l'archipel, comme ce qui est actuellement pratiqué pour l'archipel méridional. En effet, un des derniers objectifs du Plan Touristique est de mettre en place plus de 3 500 lits dans les atolls de Seenu et de Gaaf Dhaal. Un *resort* dans l'île de Vilingili, atoll de Seenu, devrait d'ailleurs ouvrir ses portes à la fin de cette année⁸⁰, favorisant une dynamique pour des implantations futures. Dans cette perspective, la construction d'un aéroport international dans l'île de Gan est nécessaire et assurerait le développement de l'activité touristique des atolls de Gaaf Dhaal, Gaaf Alif, Laamu. Pour le gouvernement, ce programme permettrait de créer de nombreux emplois locaux dans des atolls, victimes jusqu'à présent d'un exode insulaire important, tout en réduisant la part des expatriés dans ce secteur.

Ce développement touristique rapporterait à l'Etat, d'après les estimations, plus de 525 millions \$ US de recettes (Commission of the European Communities, 1995), ce qui permettrait également de réduire, jusqu'à présent l'emprise de la bourgeoisie et des dirigeants politiques, localisés à Malé, qui ont assuré jusqu'à présent leur domination économique et politique sur l'ensemble du pays.

⁷⁹ Raa, Baa, Lhaviyani, Vaavu, Meemu, Faafu

⁸⁰ Entretien avec M. Mohamed Imad – Ministère du Plan et du Développement National

La conception touristique maldivienne est avant tout liée à l'autonomie et l'indépendance de chacune des îles-hôtels, ce qui est facilité par l'importance des territoires insulaires. Comme le soulignent R. Sathiendrakumar et C. Tisdell (1989), le tourisme des Maldives est basé sur le concept « getting away from crowds ». Chaque *resort* constitue donc une entité autonome avec ses propres structures de gestion et d'approvisionnement directes depuis l'étranger (G. Cazes, 1989), lui assurant ainsi une vie en autarcie mais largement dépendante de ses importations qui couvrent 90 % de ses besoins (nourriture, carburant pour l'électricité...). En moyenne, cet isolement touristique dure actuellement 8 jours⁸¹ ; il était de 7,1 jours en 1980 (Gay J-C., 2001). Les *resorts* sont réservés au touriste, c'est-à-dire à « toute personne entrant aux Maldives, qui n'est pas citoyen maldivien et qui ne possède pas une carte de résident permanent » (Ministry of Tourism, 1999). Ainsi, à l'exception de quelques riches maldiviens ou personnels des ministères qui séjournent dans ces structures pour le week-end, ce sont des lieux peu fréquentés par la population autochtone.

Les employés de nationalité maldivienne ne sont pas majoritaires dans les *resorts* et cela malgré une politique incitative du gouvernement (Republic of Maldives Ministry of Planning and National Development, 2002) et un taux de chômage important. Ils viennent du Sri Lanka, d'Inde, du Bangladesh car l'offre est abondante et le salaire plus élevé que dans leur pays. La part des étrangers est passée de 9 % en 1986 à 47 % en 1997 (Gay J-C., 2001) et cela malgré la mise en place depuis 1987 d'une école hôtelière dans la capitale. Ainsi, à l'heure actuelle, l'industrie touristique emploie directement plus de 14 000 personnes contre 10 500 en 1997 (Domroes M., 1999) et autant de façon indirecte. Les employés vivent en marge du *resort* dans un village local, où il y a un chef, qui assure la communication entre le personnel et l'administration, une mosquée, des maisons traditionnelles, sans confort et sans intimité. Les femmes maldiviennes ne peuvent travailler dans les *resorts* sauf lorsque les structures touristiques sont suffisamment proches de leur île d'origine pour leur éviter de séjourner dans l'île après le coucher du soleil, comme, par exemple, à *Sonevafushi* dans l'atoll de Baa, ou *Bandos* dans l'atoll de Malé nord. Cette crainte vient de la solitude et de la misère sexuelle dont sont victimes les hommes qui peuvent rester plus d'un an sans voir leur famille. Afin d'éviter l'éloignement, certaines familles choisissent de s'établir à Malé, augmentant un peu plus la pression anthropique sur cette capitale surpeuplée.

Si l'activité touristique constitue actuellement le facteur majeur du développement économique, le secteur de la pêche reste le plus gros employeur de l'Etat.

7.3.3. ... et symboliquement réglementée

La construction d'une structure touristique nécessite un important cahier des charges qui est soumis à un cadre juridique établi à partir de la loi touristique 15/1979, qui institutionnalise l'investissement de

⁸¹ 8,7 en 1999, 8,39 en 2002 et 8,42 en 2003

capitaux étrangers (*National Environment Action Plan* de 1989 ainsi que *Environment Protection and Preservation Act* de 1993). Ainsi, il impose un ratio d'une île-hôtel pour trois îles naturelles⁸² au sein d'un atoll, que seulement 20 % de la superficie totale de l'île touristique soit urbanisée, que les constructions s'établissent en retrait à 5 m minimum du rivage, que les bâtiments ne dépassent pas la hauteur de la végétation, que la surface des bungalows édifiés sur l'eau, dans le lagon, doit avoir son équivalence dans l'île (cf. Figures 176, 177 - annexe). Pourtant lorsque l'on observe l'atoll de Malé nord, les proportions sont différentes (cf. Figure 154 - annexe). Sur les 56 îles comptabilisées, 27 sont des *resorts*, 13 sont inhabitées et les autres sont soit habitées, soit utilisées par l'homme. Des mesures inscrites dans le loi de 1979 sont, quant à elles, plus difficilement respectées comme, par exemple, l'interdiction de perturber la faune et la flore marines ou de modifier la morphologie du lagon. En 1990, de nouvelles normes environnementales ont été instituées pour promouvoir et préserver l'intégrité de l'écosystème. Il s'agit, par exemple, de la mesure présidentielle qui vise à ne pas modifier la dérive littorale lors de la construction de quais ou de jetées ou de celle qui stipule que le corail ne doit pas être extrait afin de fournir des matériaux à la construction. Ces lois visent à « limiter la dégradation de l'environnement et aider au maintien, à long terme, d'une nature intacte » (Housing and Environment Ministry of Home Affairs, 1999). Cet intérêt environnemental exacerbé coïncide avec le fait que l'archipel maldivien est « la destination touristique environnementale la plus exceptionnelle à travers le monde » (Commission of the European Communities, 1995).

L'implantation de nouvelles structures hôtelières a compartimenté l'archipel touristique suivant des critères sociaux. Les premières îles-hôtels, au plus près de la capitale, sont soit occupées par des hommes d'affaires venus travailler à Malé, soit par des classes sociales assez basses ayant bénéficié de tarifs promotionnels. Ces îles, comme Kurumba village ou Bandos, deviennent également des îles-conférences pour les ministères de la capitale ou encore des hôtels de week-end pour les expatriés travaillant à Malé comme Giraavaru. Les vieilles structures hôtelières, très artificialisées comme Paradise Island, sont de fait moins recherchées que les hôtels plus naturels occupés par une clientèle haut de gamme. Elles ont également l'inconvénient d'être trop proches de l'aéroport, trop proches de la capitale, et pas assez isolées. Les touristes actuels recherchent l'exotisme, le dépaysement, et une nouvelle idée de la Nature qu'ils ne trouvent pas dans ces structures. C'est pour s'adapter à cette nouvelle demande, en évitant sa fermeture, que l'île-hôtel de Farukolhufushi (Club Med) a organisé pour sa clientèle une journée sur l'îlot d'Ehuru Huraa, appartenant à l'île-hôtel de Rihiveli. Cette journée associe un voyage en hydravion, alors que les deux *resorts* sont à 1 heure de bateau rapide, un pique-nique et à 1 heure de détente sur l'attraction première de l'îlot, à savoir sa queue de comète soit une escapade de 3 heures maximum qui permet aux touristes du Club Med d'apprécier plus justement la notion d'isolement et les offres d'un hôtel luxueux.

⁸² « control chiefly the isolated geographical dissemination of resorts » Ministry of Tourism (1999) - *Maldives Tourism act*. 12 p.

Si la première étape du morcellement de l'espace touristique se fait suivant le concept d'une « île-un hôtel », la seconde étape s'organise suivant le concept une île-une nationalité. Ainsi, s'individualisent l'île francophone (*Rihiveli*), l'île allemande (*Kandooma*), l'île italienne (*Giraavaru*), l'île japonaise (*Vaadhoo*)...

A la différence d'Etats insulaires qui ont su refuser que leurs milieux, physique et humain, subissent une trop grande menace par l'essor brutal de l'activité touristique (Huetz de Lemps, 1989), le développement touristique des Maldives prime sur l'environnement et sur tout autre développement étatique. Ceci s'explique par le fait que le tourisme est le premier secteur économique de l'Etat. Il génère 17 % du PIB, représente 90 % des devises étrangères et 40 % des recettes du gouvernement (Domroes M., 2001).

Les quatre-vingt-sept *resorts* payent un loyer annuel au ministère du tourisme qui s'élève entre 5 et 20 millions \$ US. Cette somme est calculée individuellement suivant la catégorie de l'hôtel et sa distance par rapport à l'aéroport d'*Hulhulé* (Ministry of Tourism, 1999). Le gouvernement perçoit pour chaque *resort* une taxe annuelle par lit, qui varie, suivant la catégorie de l'hôtel, entre 2 000 et 3 000 \$ US et une taxe journalière⁸³ par lit qui s'élève pour chaque touriste à 6 \$ US⁸⁴. Il est également exigé de chaque touriste quittant le territoire une taxe de 10 \$ US⁸⁵. Indirectement, le gouvernement taxe l'importation des produits destinés aux hôtels, comme l'alcool à hauteur de 200 %, et les produits alimentaires de l'ordre de 30 %.

Le tourisme est une telle aubaine pour le gouvernement qu'il a décidé de poursuivre son développement. Il faut être toutefois prudent. La sursaturation des lieux peut causer le déclin de l'activité comme l'a exprimé Butler en 1980 (Shaw G. et Williams A.M., 1994) à travers son modèle analysant le cycle de vie d'un *resort*. Pour lui, six stades d'évolution vont expliquer la construction touristique d'un lieu : (1) découverte de l'archipel par un nombre réduit de touristes, logeant dans de petites structures et attirés par la beauté naturelle des îles ; (2) émergence de l'activité et implication limitée de la population locale ; (3) décollage de l'activité par l'arrivée d'un grand nombre de touristes qui crée des tensions avec la communauté locale ; (4) consolidation du secteur touristique qui devient le premier secteur économique de l'archipel, bien qu'un ralentissement se fasse sentir auprès des vieilles structures ; (5) stagnation de l'activité ; (6) déclin de l'activité et baisse de la fréquentation, développement de nouveaux *resorts* avec de nouvelles offres. Ce déclin s'observera jusqu'à ce que de nouvelles actions redynamisent l'activité. Comme tout modèle, il est discutable, mais il peut éclairer le fonctionnement touristique d'un espace géographique suivant des échelles d'observations différentes, comme un *resort* ou un archipel.

⁸³ Pour les touristes, elle est comprise dans le prix du séjour

⁸⁴ 3\$ en 1980 et 3,5\$ en 1984

⁸⁵ 6\$ en 1980 et 7\$ en 1984

Les baux sont très contrôlés et peuvent osciller entre 20 et 35 ans, quelquefois 50 ans lorsque les investissements initiaux ont été très coûteux pour le locataire (Ministry of Tourism, 1999). Ils concernent non seulement les structures hôtelières, mais également les îles naturelles destinées au seul usage récréatif. Ainsi, l'île de Mushimasgali dans l'atoll d'Ari, louée pour une durée de vingt ans, sera consacrée aux activités nautiques et elle constituera une zone d'accueil pour les bateaux en croisière dans l'archipel.

Si, à l'heure actuelle, les *resorts* sont gérés par des sociétés internationales⁸⁶, des personnes privées maldiviennes⁸⁷ ou étrangères comme, par exemple, les structures de *Rihiveli*, *Giraavaru* et *Cocoa* qui appartiennent à un homme d'affaire singapourien, 2016, date retenue par le Président de la République, marquera la rétrocession de toutes les structures touristiques, présentes dans l'archipel au gouvernement⁸⁸.

7.3.4. Les Tuvalu : un archipel aux capacités touristiques limitées

Il a été souvent avancé que la mise en place de structures touristiques pouvait permettre à un pays de développer son économie. Désormais, on affirme que pour qu'il y ait un devenir touristique, il faut que l'usage de l'espace soit polyvalent et qu'il y ait une certaine dynamique économique, ce qui semble difficile pour des Etats insulaires comme les Tuvalu qui, étant économiquement indépendants, ont des ressources limitées.

Aux Tuvalu, comme dans de nombreux micro-Etats insulaires, l'implantation de structures hôtelières semble être la solution à tous les maux. Ainsi, à chaque nouveau plan de développement étatique (Government of Tuvalu et Tourism Council of the South Pacific, 1992), le ministère du Tourisme évoque la mise en place de structures d'accueil dans des îles comme Tepuka, Fualefeke, Paava, pourtant comprises dans la réserve marine protégée, et de Tengako dans l'atoll de Funafuti. Comme en 1972, pour l'archipel des Maldives, ce sont les contraintes liées à la dispersion géographique de l'archipel qui contraignent les aménageurs à préférer les îles de l'atoll principal. D'après le ministère du Tourisme de Fongafale, une fois que les moyens financiers auront été trouvés, la création d'une structure hôtelière sera immédiate. Toutefois, dès que l'on s'interroge sur les besoins en eau, en électricité, l'acheminement des touristes vers la structure hôtelière, tout se complique. Un complexe touristique a des besoins en eau qui sont largement supérieurs à la possibilité des lentilles d'eau douce localisées dans les atolls. Certes, on pourrait envisager la mise en place de station de désalinisation comme dans certaines structures hôtelières maldiviennes, mais est-ce la seule limite ? Les Tuvalu ont-elles la réelle capacité de développer cette activité ? Certes, la population est extrêmement

⁸⁶ Universal possède Kurumba village, Laguna, Full moon, Baros, Kuramathi village, Kuramathi Cottage Club, Kuramathi Blue Lagoon, Nakachafushi

⁸⁷ Le Ministre de la Justice est propriétaire de Kandooma

⁸⁸ Entretien avec M. Zameer - Ministère du Tourisme

chaleureuse, les îles choisies revêtent un caractère idyllique, mais imaginons ce que pourrait ressentir un touriste en atterrissant sur l'île de Fongafale frangée de côtes sans sable mais avec des enrochements, creusée de *borrow pit* remplis de déchets et défigurée par des engins rouillés disséminés le long du rivage lagonaire. Pour qu'il y ait développement touristique, il faut que l'île capitale, qui devient alors la vitrine de l'archipel, soit le reflet des autres îles ; or les pollutions visuelles abondent sur Fongafale. La mise en place d'un site internet, depuis juin 2004⁸⁹, vantant les paysages de l'archipel tuvaluan, par le biais de photographies idylliques, tente de casser cette image négative. Un autre problème majeur au développement de l'activité est lié à la politique de transport. On sait désormais que l'avion est fondamental au développement touristique des îles intertropicales (Gay J-C., 2000), et, de ce fait, les deux dessertes semestrielles effectuées par Air Fiji vers la capitale des Tuvalu ne peuvent contribuer efficacement à la mise en place d'un tourisme avancé. Les Tuvalu restent donc dans une phase définie par J-C. Gay (2000) comme « prototouristique » qui ne permet pas, à l'heure actuelle, d'envisager un avenir rentable pour l'Etat. Au-delà du nombre limité de vols qui contraint l'activité tourisme à demeurer balbutiante (cf. Figures 178, 179), il faut ajouter les nombreuses annulations pour des problèmes de maintenance de l'appareil, le coût élevé du vol entre Suva et Fongafale (environ 614 €), le nombre réduit de places disponibles par vol.

A la différence des Maldives, le développement touristique des Tuvalu ne constitue pas la première source de devises du pays. On ne trouve dans l'archipel qu'un seul hôtel gouvernemental, localisé sur l'île de Fongafale, le Vaiaku Lagi hôtel. Lors de notre dernier séjour, il devait être vendu à un tour operator afin de dynamiser le développement touristique mais, plus de deux ans et demi après, rien n'a été fait. Il existe également plusieurs *guest houses* sur l'île de Fongafale, une sur les îles de Funafara et de Vaitupu, ainsi que d'autres provisoires tenues soit par le pasteur soit par le personnel du bureau de l'île comme à Nukulaelae, Nui, Nanumanga, Nuitao. Toutes ces structures sont conçues pour des aventuriers car l'eau est rare, les toilettes inexistantes, la nourriture peu variée, et le couchage rudimentaire.

7.3.5. La pression touristique : un danger pour les Maldives ?

« La monoculture touristique génère certainement un risque de dépendance et de transformation durable des espaces insulaires » (Brigand L., 2000).

Le cas des Maldives est particulier car l'activité touristique, s'est faite à partir de territoires vierges, sans modification fondamentale des activités traditionnelles comme en ont connue de nombreux autres archipels, mais elle reste consommatrice d'espace. Si cette activité a insufflé une dynamique

⁸⁹ <http://www.timelesstuvalu.com/>

Figure 178 : Evolution du nombre de touristes dans l'archipel des Tuvalu

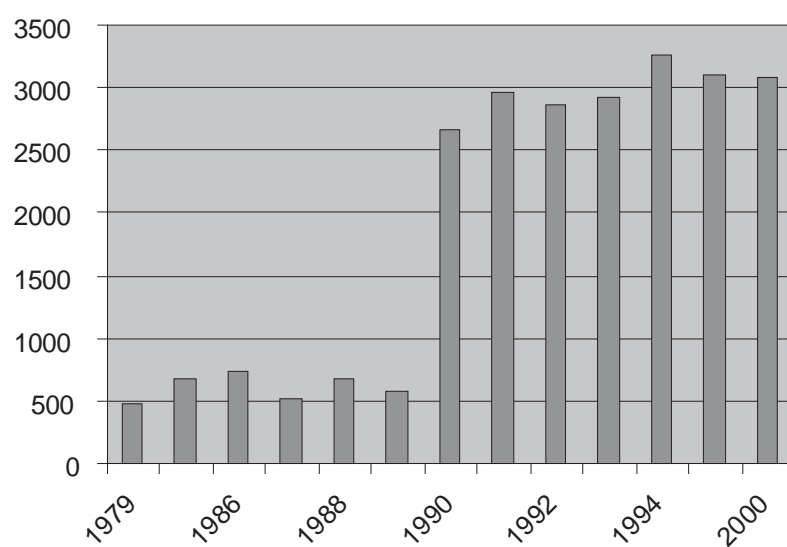
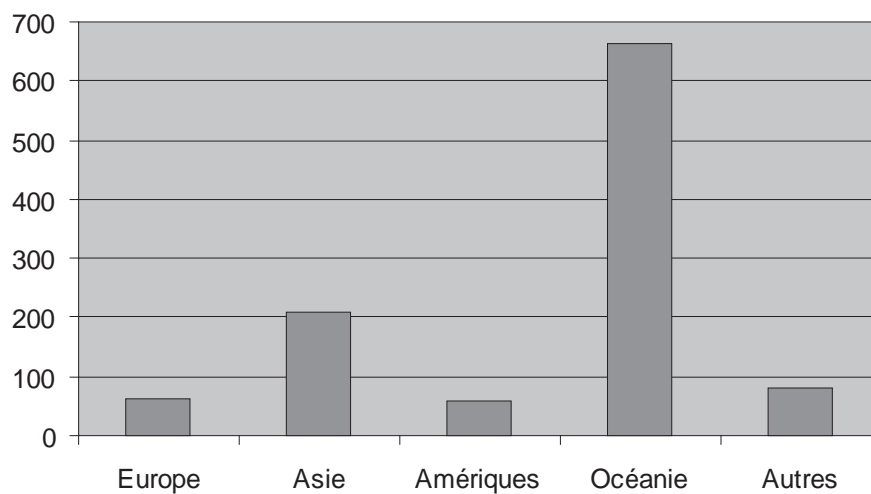


Figure 179 : Origine des touristes durant l'année 2000 à titre d'exemple



économique primordiale pour l'Etat sans perturber directement le milieu culturel insulaire, elle a été la cause de conflits d'usage avec la population locale.

Dans l'archipel des Maldives, on parle de saisonnalité touristique, mais on n'identifie pas clairement une haute et une basse saison car l'occupation des structures hôtelières n'est jamais maximale, même durant la période très propice située entre novembre et mars, elle varie peu d'un mois à un autre. Ainsi, d'après une moyenne effectuée sur les années 2002 et 2003, les structures hôtelières étaient utilisées respectivement à 69 % et 77 % de leur capacité totale.

7.3.5.1. Diversification de l'offre touristique

Les brochures touristiques vantent le monde sous-marin bien, que la plongée ne soit plus, à la différence des prémices de l'activité touristique, un secteur porteur (Preu C. et Engelbrecht C., 1994). Il est cependant plaisant d'avoir une telle richesse sous-marine autour d'une île, ce qui ajoute à sa notoriété.

Le nombre de touristes séjournant dans l'archipel est en constante augmentation : 1 097 en 1972, 563 593 en 2003⁹⁰. Pour répondre à une demande sans cesse croissante, le gouvernement autorise la construction de nouvelles structures touristiques de plus en plus éloignées de la capitale, et diversifie ses activités en développant de nouveaux produits touristiques. Cette mesure avait été préconisée dès 1983 par un cabinet danois qui avait été chargé de réaliser une expertise sur le développement touristique de l'archipel. Pour lui, le développement devait concerner tout le territoire, en utilisant les îles dotées de pistes d'atterrissage, afin d'assurer un rééquilibrage de l'activité face à la concentration de la partie centrale. Ce refus de développer à cette époque la partie méridionale de l'archipel était une volonté affirmée car le sud était craint du gouvernement de Malé. Il est encore à l'heure actuelle connu pour son modernisme et sa volonté d'indépendance, qui l'avait mis à l'écart du développement économique après la tentative de sécession de 1959 quand la « *United Suvadivian Republic* »⁹¹ fut proclamée avec Abdulla Afif Didi comme président.

Pour cela, l'ensemble de l'archipel est ouvert au tourisme mais sur des concepts différents de ceux qui ont permis leur succès. Sans remettre en cause le concept « une île-un hôtel », qui est le symbole du tourisme maldivien (Gay J-C., 2001), le gouvernement souhaite mettre en place une nouvelle organisation de type « ne île-une famille »⁹². Il s'agit de développer un tourisme de luxe basé sur un mode de vie insulaire rudimentaire. L'autre politique de développement des croisières concerne à terme l'ensemble de l'archipel notamment par la mise en place d'équipements spécialisés comme des

⁹⁰ [http : //www.planning.gov.mv](http://www.planning.gov.mv)

⁹¹ Trois atolls proclamèrent cette nouvelle république : Addu, Huvadhu nord et sud.

⁹² Entretien avec Mr. Hunaif – Ministry of Planning

ports de plaisance, des marinas⁹³ combinées à des structures hôtelières. Les premières expériences vont être tentées dans les atolls administratifs de Haa Alif, et, plus particulièrement, sur l'île d'Uligamu dans l'atoll d'Ihavandhippolhu, où la construction d'une marina est en projet ; Haa Dhaal et Shaviyani sont déjà proposés aux touristes pour les atolls de Malé⁹⁴. Ces croisières sont différentes des « *safari boats* », uniquement liés à la plongée. Ce mode touristique semble d'ailleurs subir une légère désaffection puisque le nombre de bateaux est passé de 92 bateaux en 2001 à 76 en 2004⁹⁵. L'ouverture de nouvelles structures hôtelières dans des atolls éloignés, jusque là visités par ces bateaux de croisière, ainsi que la baisse générale du nombre de plongeurs séjournant dans l'archipel, peuvent expliquer ce recul.

Cette diversification permettait à l'archipel de devenir la nouvelle destination d'un tourisme sportif (Republic of Maldives Ministry of Planning and National Development, 2002). Les îles, de par leur position géographique, vont jouer, quant à elles, un rôle d'étapes pour ce tourisme de croisière. Ce principe consiste donc à redévelopper un tourisme de passage, qui était pratiqué dans le milieu des années 1970, en complément d'un tourisme de séjour, sédentaire et largement majoritaire. Pour autant, ces nouvelles offres touristiques ne remettent pas en cause la séparation distincte de l'activité avec la vie insulaire autochtone. Cette mesure imposée par le gouvernement depuis le début des années 1980 vise à respecter l'identité culturelle et religieuse des populations autochtones. Ce sont ainsi plus de cinquante pensions de famille et de locations qui ont été fermées dans des îles habitées. Seules, quelques îles locales de pêcheurs, comme l'île de Guraidhoo dans l'atoll de Malé sud, sont visitées durant les séjours touristiques, le « *island hopping* », mais sont contraintes à une réglementation rigoureuse imposée par le pouvoir central. Les visites dans l'île doivent être courtes, les touristes ne peuvent communiquer avec la population locale, sauf pour les relations commerciales, et doivent avoir quitté l'île avant la tombée de la nuit.

Comme le souligne A. Huetz de Lemp (1989), la pression de l'activité touristique sur l'environnement dépend avant tout de l'occupation du sol le long des rivages. Désormais, la diversification de l'offre touristique, la multiplication des *resorts* à travers l'archipel posent des problèmes dans la gestion du territoire insulaire. En effet, les activités qui ont un poids économique et stratégique important dans un territoire conservent leur espace (Merlin P., 2001) au détriment des activités plus fragiles, qui lésées, peuvent déclencher des conflits d'usage.

Le gouvernement maldivien désirerait diversifier son activité de loisirs en se concentrant sur le marché asiatique et en développant des produits touristiques locaux. Afin d'atteindre son objectif, il souhaite faciliter l'investissement des ressortissants locaux en allégeant les taxes à l'installation et en

⁹³ <http://www.frdp-maldives.gov.mv>

⁹⁴ <http://www.visitmaldives.com.mv>

⁹⁵ <http://www.visitmaldives.com.mv>

utilisant d'anciennes îles habitées comme îles touristiques, comme cela s'est fait pour l'île de Vilingili (atoll de Malé nord).

La politique du transport aérien peut influencer le tourisme de demain car, pour que cette industrie soit pérenne et continue à se développer, il faut que le gouvernement réorganise ce secteur.

Dans le cas des espaces insulaires, les objectifs de la préservation de l'environnement entrent en conflit avec ceux du développement économique et touristique de l'archipel. Pourtant, la mise en place d'un éco-tourisme pourrait concilier les deux conceptions, mais il faut pour cela envisager une réduction du nombre de touristes et des structures touristiques. Si cela s'avère difficilement modifiable pour des archipels où le tourisme est le secteur économique dominant, cette formule peut être appliquée dans des archipels où il est peu ou pas implanté. Pour cela, il faut peut-être contrôler le nombre de touristes pénétrant dans l'archipel, établir en somme un seuil de tolérance au delà duquel les îles et l'environnement peuvent subir des dommages irrémediables.

7.3.5.2. Le poids de l'activité touristique sur l'environnement insulaire

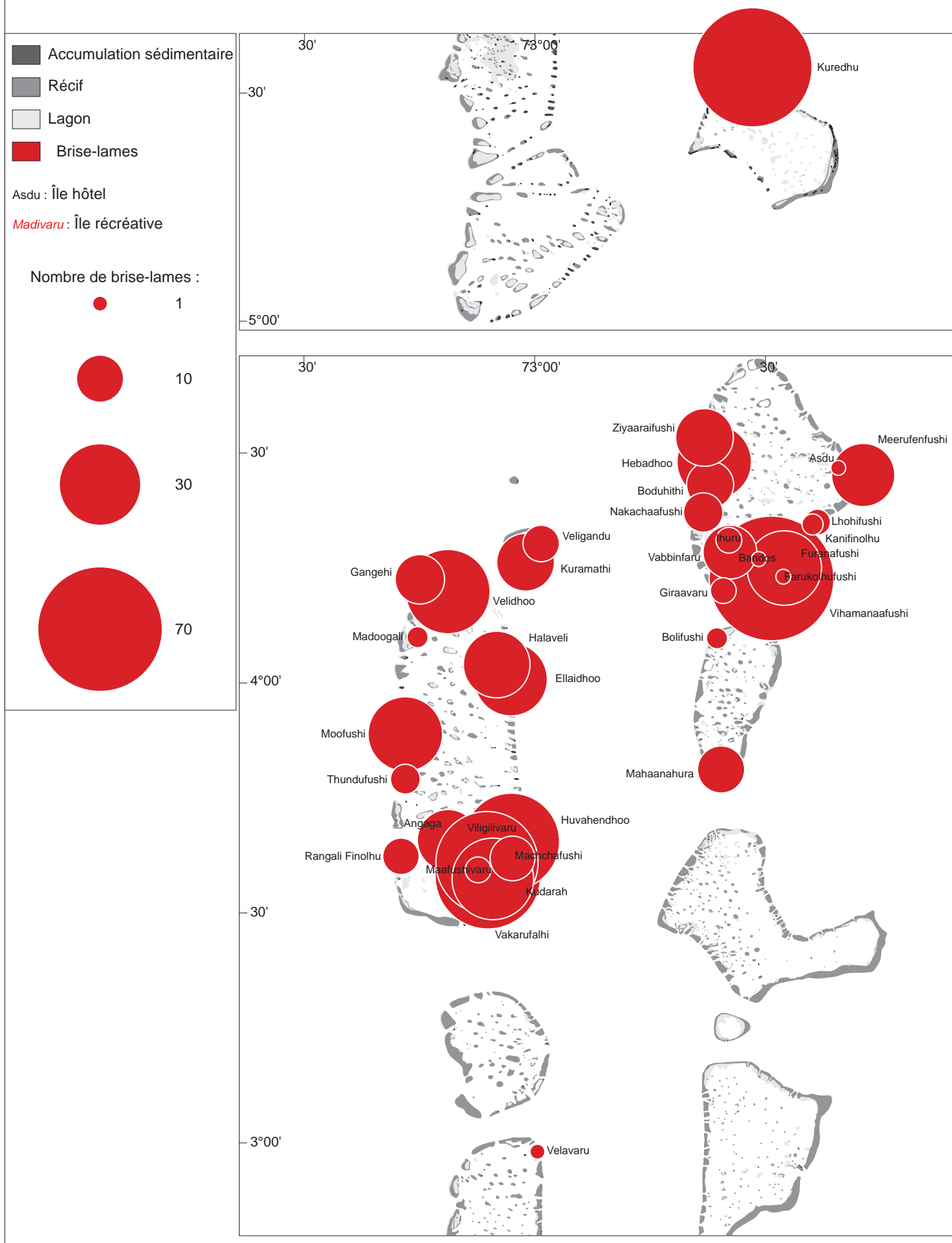
L'activité tourisme a conduit à la dénaturation (cf. Figures 180 et 181, 182, 183, 184 - annexe) de certaines portions de côtes (Flament J. *et al.*, 1992). D'après Preu *et al.* (1992 in Preu C. et Engelbrecht C., 1994), l'impact de l'utilisation touristique d'îles inhabitées ne se limite pas à la structure hôtelière mais s'étend bien au delà des frontières du récif, affectant même les îles voisines.

La demande touristique est donc responsable d'un grand nombre de perturbations qui peuvent être variées à l'échelle d'un récif. Certaines structures hôtelières, à l'état naturel, sont peu attractives pour les touristes, en raison de l'affleurement de beach rock lors d'un renversement des vents, ou de l'érosion continue de ses plages. Pour remédier à cela, certains *resorts* ont donc eu recours au rechargement de plage, par prélèvement sédimentaire dans le lagon, comme à Hudhuveli dans l'atoll de Malé nord, ou alors à la création de plages artificielles élaborées à partir de corail concassé, comme sur l'île de Kandooma dans l'atoll de Malé sud.

Lorsque la végétation autochtone n'était pas assez « tropicale », elle a été remplacée par une végétation visuellement plus adaptée...

Ces changements peuvent affecter directement la morphologie d'un site « *changes caused by tourism on the coastal environment are evident in many Maldivian tourist resorts. ... all resorts are affected by coastal erosion although effective steps have been taken, mostly through groynes on the foreshore of the reef banks* » (Domroes M., 1993) ou, indirectement, par la pression des constructions imposent au milieu. Les îles, par essence, sont des formes mobiles, changeantes au gré des houles et des vents. Les plages peuvent alors évoluer, ce qui pose des problèmes pour les gestionnaires qui souhaitent offrir à leur clientèle une « île-carte postale ». Pour cela, ces gestionnaires cherchent à fixer le trait de côte en l'artificialisant partiellement comme les îles-hôtels de *Giraavaru, Mahaana Elhi Huraa* (Rihiveli) ...

Figure 180 : Inventaire des ouvrages côtiers dans les structures hôtelières : le cas des brise-lames



ou totalement comme *Vihamanaafushi* (Kurumba Village) ou *Furanafushi* (Fullmoon Beach Resort)... Pour remédier à cela, les constructions actuelles doivent s'intégrer le plus possible à l'environnement, à l'instar de ce qui est pratiqué sur les îles d'Ihuru, dans l'atoll de Malé nord, et de Sun Island, dans l'atoll d'Ari, qui ont toutes deux reçu le prix de l'environnement attribué par l'Etat pour le respect de l'environnement insulaire et de l'écosystème récifal.

Si les dégâts occasionnés par les plongeurs libres autour des structures hôtelières, ne sont pas la mesure de ceux générés par des extractions de matériaux coralliens ou par le blanchiment, ils ne sont pas négligeables (Allison W.R., 1996). Une surveillance menée sur le récif de Kurumba hôtel a montré que plus on se rapproche du secteur récifal situé proche de l'espace de baignade fréquentée par les touristes, plus les coraux sont cassés, plus on s'en éloigne plus les coraux sont sains.

Suivant le mode de fonctionnement des *resorts*, notamment dans le traitement des déchets et des eaux usées, la pression environnementale sera plus ou moins importante. Avant la construction de Thilafushi, qui accueille désormais la production de déchets d'un grand nombre de *resorts* de la partie centrale des Maldives, les déchets organiques étaient soit enfouis, comme à *Lhohifushi*, soit jetés dans l'océan, comme aux îles de *Bandos*, *Meerufenfushi*, et *Vaadho* (Domroes M. *et al.*, 1995), soit exportés vers l'étranger. Afin de limiter la production de déchets, une compagnie aérienne allemande, la LTU, a introduit, depuis 1993, un système de collecte de déchets inorganiques pour ses passagers. A l'arrivée dans l'archipel, ils se voient offrir un sac poubelle, pour la durée de leur séjour, qu'ils rapporteront avec eux afin qu'il soit traité.

La méthode de l'enfouissement, qui est encore largement pratiquée dans des îles locales et peut-être dans certaines îles-hôtels, pose un problème d'impact non seulement sur la lentille d'eau douce, mais également sur la structure récifale par l'infiltration de produits divers comme les sulfates d'hydrogène, le méthane ou l'ammonium, causant alors une eutrophisation du milieu. Des analyses de la lentille d'eau douce ont révélé, par exemple, des teneurs en nitrate de l'ordre de 90 mg/l, largement supérieures à celles qui sont mesurées sur les îles ayant un mode de vie plus traditionnel, où elles ne dépassent pas 40 mg/l (Preu C. et Engelbrecht C., 1994).

Pour éviter cela, chaque nouvelle structure devra s'équiper d'une installation permettant de traiter les eaux usées. La pression sur la couche aquifère naturelle sera également réduite par l'instauration, dans toutes les structures touristiques, d'un centre de désalinisation des eaux. Lorsque l'on interroge les personnes du ministère, ils considèrent que le problème de traitement des déchets est désormais assuré par l'installation d'incinérateurs, de compacteurs de bouteilles et de broyeurs d'ordures sur chaque nouveau *resort*. Si l'on considère que ces mesures sont effectives depuis 1999, elle concernerait trois structures touristiques sur les 87 existantes. Les autres *resorts* déversent des canettes compactées par centaines à la limite récif-platier, comme aux abords de l'île d'*Olhuveli* dans l'atoll de Malé sud, ou

règlent leur problème d'eaux usées par une évacuation au delà du récif par un système de tuyaux en PVC. Ces *resorts* appliquent la loi de 1979 (Ministry of Tourism, 1979) qui annonce que « all garbage disposed into the sea should be done as far away into the sea as necessary in order to ensure that it does not get washed on to any islands with the current ».

Au regard du développement touristique actuel et du modèle exposé préalablement, il faut nous interroger sur le devenir de cette activité. Son maintien, rentable sur le long terme, semble difficile à envisager, étant donné le renouvellement constant de la demande touristique, la trop grande dépendance des îles face aux marchés internationaux et leur monofonctionnalité économique. Les Maldives s'y adaptent au point d'abandonner les anciennes structures pour en développer de nouvelles, mais à quel prix ?

Y-a-t-il une inquiétude à avoir sur l'avenir de cette économie en cas d'élévation du niveau de la mer ?

Certains auteurs (Deda P., 1999) pensent que cela va avoir un impact important sur l'économie locale et, plus particulièrement, en diminuant l'attraction des touristes pour cette destination. Bien au contraire, nous pensons que la disparition future de l'archipel incite des touristes à le visiter avant qu'il ne disparaisse. Dans ce cas, le catastrophisme colporté par les médias joue un rôle important dans le développement économique de l'activité.

Chapitre 8 – Les pressions anthropiques exercées sur les milieux insulaires : le cas des artificialisations

Quels peuvent être les impacts d'une politique de redéploiement touristique sur l'ensemble de l'archipel, de la création de nouvelles îles ou de l'abandon d'anciennes, d'une protection outrancière des littoraux dans une volonté de ne pas disparaître... ?

D'après le rapport de l'UNDP (1998), l'érosion côtière dans l'archipel des Maldives est un problème courant qui semble s'accroître dans un contexte de changements climatiques : « *Although beach erosion is a natural phenomenon, linked to the two main monsoon periods, there appears to be evidence in Maldives of an intensification of erosion processes for reasons which are not entirely clear but which may be related to climate change and sea state* ». D'après les données publiées dans l'étude, collectées à partir d'un questionnaire, on observe une érosion importante et généralisée du littoral et cela sur l'ensemble de l'archipel. Ainsi, les îles anthropisées seraient victimes d'une érosion à 70 %, bien que le pourcentage calculé à partir du tableau 14 représente 94 %. Cette différence est due à l'île de Malé. En effet, quoique le rapport considère Malé comme une île n'ayant été victime d'aucune érosion, puisqu'il s'agit d'une île totalement artificialisée, cette considération ne cesse pas d'étonner.

En 2001, un nouveau rapport de l'UNDP (2001) estime que plus que 50 % des îles habitées et 45 % des *resorts* sont victimes d'érosion. La différence notable entre ces deux études est surprenante. Elle peut s'expliquer soit par un retour important de sable à la côte, soit par les ambiguïtés du questionnaire notamment si les paramètres considérés étaient différents des précédents.

Tableau 14 : Recensement étatique des érosions insulaires dans les atolls administratifs maldiviens (en %)

Haa Alif	94	Vaavu	100
Haa Dhaal	98	Meemu	97
Shaviyani	100	Faafu	100
Noonu	77	Dhaal	100
Raa	98	Thaa	100
Baa	100	Laamu	87
Lhaviyani	60	Gaaf alif	83
Kaafu	100	Gaaf Dhaal	100
Alif alif	90	Gnaviyani	100
Alif Dhaal	100	Seenu	100

Selon le site internet⁹⁶ du ministère de l'environnement, 86 îles seraient affectées par une érosion sévère depuis 1990 dont 7 sont inhabitées.

Dans le cas des Tuvalu, aucun rapport récent ne fait état de l'évolution des côtes. Seul, un rapport émis par la Communauté européenne en 1986 mentionne les secteurs insulaires érodés.

Au début des années 1990, l'IPCC (1990 *in* Pernetta J.C. et Elder D.L., 1992) considère quatre comportements littoraux à adopter en cas d'élévation du niveau de la mer : se défendre, s'adapter, se retirer ou utiliser des solutions provisoires. Pour cela, on envisage :

- une solution technique fondée sur des réponses lourdes tenant la mer à distance des côtes,
- une réponse écologique et naturelle consistant à laisser le territoire s'adapter aux nouvelles conditions environnementales, quitte à s'éroder,
- une adaptation douce de l'homme face à l'utilisation du littoral et de ses ressources passant nécessairement par un changement de comportement et de mentalité.

La réponse des populations face aux changements climatiques globaux a donc été de deux types, soit contre-attaquer, soit renoncer. Si l'archipel des Maldives a adopté le choix d'une politique volontariste, les Tuvalu ont à la fois fait le choix d'une politique de résistance et d'acceptation.

Aux Tuvalu, la remontée du niveau de la mer a exacerbé un conflit de générations. Les anciens estiment, comme cela est écrit dans le premier livre de la Bible, qu'ils ne seront pas contraints de quitter leur territoire, alors que la génération actuelle, en accord avec les prévisions des organisations internationales, pense que la remontée du niveau de la mer pourrait la contraindre à quitter sa terre. Par mesure de prudence, le gouvernement a souhaité prévenir au mieux la situation, en cherchant une terre d'accueil pour sa population, auprès de gouvernements étrangers. Après des discussions avec les gouvernements fidjien, puis australien, des accords ont été passés avec le gouvernement néo-zélandais. Malgré une histoire commune avec les Fidji, où 300 habitants de l'île de Vaitupu s'installèrent après la Seconde Guerre mondiale sur l'île de Kioa⁹⁷, qui fut achetée par le gouvernement tuvaluan, l'instabilité de l'Etat fidjien en 1999 interrompit toute négociation. Dès à présent, les Tuvaluans qui le souhaitent peuvent émigrer vers la Nouvelle-Zélande. Cet exode est contrôlé puisqu'il a été établi que la capacité d'accueil ne dépasserait pas 70 personnes par an. Toutefois, cet accord n'empêche pas au gouvernement d'envisager une artificialisation du trait de côte de Fongafale pour la population qui souhaiterait rester.

Aux Maldives, il n'a jamais été envisagé par le gouvernement de chercher une terre d'accueil. Il souhaite livrer une lutte acharnée contre la mer par le biais d'une artificialisation quasi-totale des

⁹⁶ <http://www.planning.gov.mv/yrb2004/yrb04/Yearbook/2.Environment/2.2.htm>

⁹⁷ L'île de Kioa est située sur la côte est de l'île de Vanua Levu

îles habitées. D'ailleurs, dès 1993 (Griffith M.D. et Ashe J.), la protection totale de l'archipel était estimée à 1 milliard de dollars.

Cette différence dans le combat est due aux moyens financiers disponibles pour la protection de leurs côtes par les Etats. Ainsi, les changements climatiques et océaniques pourraient exacerber les inégalités, non seulement entre les pays développés et les pays en développement, mais également parmi les pays en développement, entre les micro-Etats insulaires.

8.1. Une politique d'aménagement côtier

Les édifices artificiels de tous ordres ont été incorporés ou substitués aux paysages naturels. La « bétonnisation » apparaît désormais comme la forme la plus efficace de l'occupation, de l'exploitation et de la protection des espaces côtiers.

8.1.1. Les raisons de la création des îles artificielles

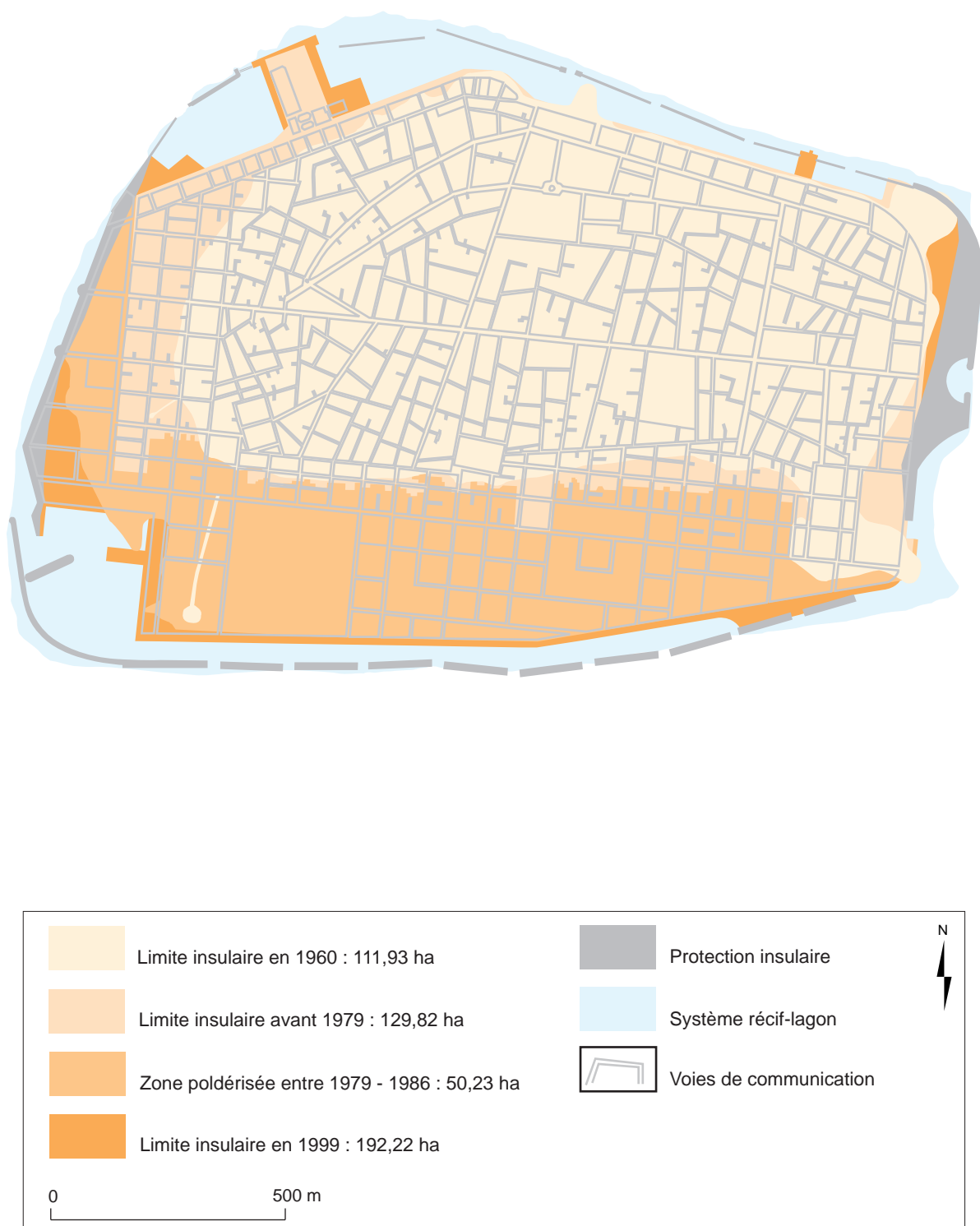
Comme nous l'avons vu précédemment, la surpopulation des micro-Etats insulaires soulève de nombreux problèmes en terme de valeur foncière. Dans le cas des Maldives, et plus particulièrement de Malé, le taux d'occupation du sol est si élevé qu'il n'est plus de surface disponible et, quand elle l'est, c'est à des coûts très importants notamment par l'artificialisation du soubassement. Au delà de cet obstacle financier, il existe des raisons d'appropriation de l'espace. En effet, les Maldiviens ne se contentent plus de l'île originelle mais veulent s'étendre au delà des frontières naturelles existantes à la limite de l'océan.

Le gain de terre sur la mer, par nécessité ou par choix, fait donc des Maldiviens les aménageurs acharnés des micro-Etats insulaires. Ils se sont inspirés des travaux réalisés par les Hollandais qui sont les maîtres incontestés des polders depuis le XIII^e siècle. Comme les Maldiviens, ils ont été poussés par le développement de leur nation, qui étouffait sur un territoire trop étroit, mais, à la différence, ils ont asséché des lacs, édifié des polders sur des espaces littoraux mobiles et non vivants.

L'île de Malé a été très tôt artificialisée puisque les premières planches qui font mention d'une protection en avant de l'île datent du XVI^e siècle au point que, dès cette époque, elle est considérée comme une « forteresse » (Pyrard de Laval F., 1998).

L'évolution artificielle de l'île de Malé est une prouesse contre les éléments naturels. A l'origine, l'île couvrait 111,9 ha (cf. Figure 185 - annexe) dont 85 % des terres étaient situées à moins de 1 m au-dessus du niveau de la mer (Pernetta J.C., 1992). La croissance rapide de la population au cours de la période 1964-1979 (U.N.D.P., 1988) a rendu nécessaires les premiers grands travaux de remblaiement (cf. Figure 186). La particularité des artificialisations de la décennie 1970 vient du fait

Figure 186 : Evolution artificielle de l'île de Malé entre 1960 et 1999



qu'elles ont toutes été financées par des fonds privés (Ministry of Construction and Public Works, 1999b). A la fin de ces années 1970, l'île s'étendait sur 129,8 ha, malgré quoi la pression anthropique se révélait de plus en plus forte et les besoins en logements, en écoles, en hôpitaux... se devaient d'être satisfaits. D'avril 1979 à juillet 1986, la nouvelle zone remblayée a permis de gagner 50,2 ha sur la mer. Les matériaux nécessaires à ces travaux (905 000 m³ d'après Edwards A.J., 1989) ont été prélevés dans le sud de l'île de Malé après le dynamitage et le déroctage du platier récifal en vue de la création d'un nouveau port. Afin de protéger cette nouvelle zone remblayée, qui a coûté au gouvernement maldivien plus de 4 millions \$ US⁹⁸, la côte méridionale a été équipée de brise-lames. Le premier, localisé au sud-est du platier sur 100 m de long et sur 1,8 m de haut, était composé d'éléments coralliens grossiers. Le second, long de 600 m, était constitué de gros blocs de corail issus du déroctage du platier, dont certains pouvaient peser plus de trois tonnes (U.N.D.P., 1988). Ces protections sont restées en place jusqu'à l'événement océanique d'avril 1987, qui a causé la submersion de la partie artificielle méridionale de l'île avec une érosion des matériaux estimée entre 300 000 m³ et 360 000 m³ d'après Van der Weele (1987) et JICA (1987 *in* Edwards A.J., 1989). Pour y remédier, le gouvernement maldivien, aidé par le gouvernement japonais, a entrepris de protéger l'espace littoral en implantant des brise-lames, sur l'ensemble de la côte méridionale. Disposés sur plus de 1,52 km de long, sur deux à trois mètres de haut, et à moins de 25 m de la pente externe, 20 000 tétrapodes fabriqués avec des blocs et du sable coralliens (Anonyme, 1997) constituent la nouvelle barrière artificielle de la capitale pour un coût de plus de 14 millions \$ US (Ali M., 1991). Jusqu'en 1992, qui marque le début d'une poldérisation systématique des îles de l'archipel, seules les îles de Malé et d'Hulhulé dans l'atoll de Malé nord et Hinnavaru, dans l'atoll de Faadhippolhu étaient poldérisées.

A l'heure actuelle, l'île de Malé est en travaux afin de protéger les secteurs habités par un « great wall », mur de protection qui, dans le secteur nord de l'île, doit remplacer d'anciennes protections ou en créer de nouvelles. Le coût d'un tel aménagement est estimé à environ 6,4 milliards d'euros. Selon nos derniers contacts auprès du ministère des Travaux publics, les coûts seraient plus importants encore, à savoir 9 000 \$ US pour mètre linéaire de côte, alors que A.A.A. Hakeem *et al.* (2004) les évaluent à 13 000 \$ US le mètre, soit 10,5 millions d'euros par kilomètre. Comme précédemment, l'artificialisation de Malé serait financée par le Japon qui reste un des plus grands bâtisseurs de côtes, ce qui lui vaut son surnom « d'archipel du béton ».

Si les aménageurs ne peuvent pousser plus en avant les limites de la ville, c'est en son sein qu'ils risquent de faire évoluer le parc immobilier. En effet, il existe encore quelques espaces vacants comme la place des « *tea shops* » proche du port sud-ouest et la partie nord-est de l'île au voisinage de la piscine artificielle. Lors de notre dernier séjour, on entendait que les « *tea shops* » allaient être déplacés au plus près du port pour permettre l'édification d'immeubles. Par contre, pour l'espace nord-

⁹⁸ 47 115 000 Rufiya (jusqu'en 2000, 1\$US : 11,77 Rf)

est de l'île, qui sert d'espace récréatif pour les jeunes de Malé, les choses paraissent plus compliquées. En effet, à chaque marée haute, même si leur vitesse est atténuée par le récif, les vagues se brisent sur le mur artificiel provoquant de vastes projections en arrière, et même des inondations lorsque les conditions météo-océaniques sont plus violentes.

Dans le cas des îles comme Malé, Hulhumalé, Hulhulé, Thilafushi, ou les îles-hôtels les investissements à leurs constructions ont été tels qu'il y a un véritable surcoût à la protection.

Comme l'a écrit J.-R. Vanney (2002), «l'évolution littorale est désormais abandonnée à la vulnérabilité des matériaux de construction». Quelle que soit la nature des îles artificielles, elles sont toutes dépendantes de l'environnement marin qui conditionne leur structure et leur survie. Des conditions comme la température de l'eau de mer, les vents sont à prendre en compte lors de la construction de l'île. En effet, la température conditionne l'action corrosive de la mer sur le béton ou le mortier..., tandis que les vents conditionnent, quant à eux, la forme des îles, les protections à apporter... Il est également important de réduire la quantité de sel dans les ciments de protection afin de pérenniser ces ouvrages sur le long terme, ce qui n'est pas le cas à l'heure actuelle (cf. Figure 187).

La première grosse opération d'aménagement aux Maldives remonte à la construction de l'aéroport d'Hulhulé. Créé en 1960, il a subi sa première importante modification en 1968, quand la piste a été allongée de 476 m et portée à 1 396 m de long par le comblement du lagon entre les anciennes îles d'Hulhulé et de Gaadhoo, qui ont vu leur population migrer vers l'ouest de Malé. En novembre 1981, un nouvel aéroport a été construit sur les bases de l'ancien, et la piste atteint 2 840 m de long sur 45 m de large. Ce sont les partenaires financiers des Maldives qui ont financé l'allongement de l'aéroport. Ainsi, le fond koweïtien a assuré le financement à hauteur de 11,5 millions \$ US, l'OPEC de 1,5 millions \$ US, le fonds saoudien de 18 millions \$ US, et l'autorité aéroportuaire des Maldives a investi 1,8 millions \$ US. Depuis la fin des travaux en 1996, il a été décidé la création d'un nouveau complexe aéroportuaire à la faveur du remblaiement du platier récifal entre les îles d'Hulhulé et de Farukolhufushi. Pour l'édification de cette île artificielle multi-fonction, Hulhumalé, qui devrait se situer à deux mètres au-dessus du niveau marin actuel, des pompes prélèvent les sédiments dans le lagon interne au rythme de 30 000 m³ de sédiments par mois⁹⁹. Cette future île abritera donc à la fois un nouvel aéroport international, plusieurs ports maritimes (de commerce et de passagers), une zone industrielle ainsi qu'une zone d'habitations dans sa partie la plus septentrionale. A l'heure actuelle, chaque aire d'accumulation est plantée en cocotiers afin d'en assurer la stabilité. Lors de notre première visite en 2000, plus de 1 000 arbres avaient été plantés dans un sol importé depuis le Sri Lanka et d'autres directement dans les éléments accumulés.

⁹⁹ Entretien avec M. Ismaël Ibrahim, Ingénieur d'étude responsable initial du projet

Figure 187 : Vulnérabilité des matériaux de construction



Île de Vilingili (atoll de Kaafu, Maldives), quai nord-nord-ouest en 2000



Île de Vilingili, quai nord-nord-ouest en 2001

La construction du port dans l'île de Foammulah constitue l'autre projet démesuré du gouvernement maldivien. Les gestionnaires gouvernementaux ont estimé que le développement économique de l'île ne pouvait se faire sans l'implantation d'un port malgré les importantes contraintes morphologiques. Il s'agit d'une île isolée située sur une plate-forme récifale étroite constamment battue par les houles. L'absence de lagon ou de passe dans le platier rend l'accostage extrêmement dangereux. Pour y remédier, les aménageurs souhaitent implanter des brise-lames sur la bordure récifale, creuser un passage au sein du platier pour permettre un accès plus facile des bateaux, tout en minimisant l'action des vagues.

Quel que soit le site choisi (nord-est ou sud-ouest), le coût de tels aménagements reste très important pour un pays en développement puisqu'il a été estimé à 4 500 000 \$ US pour le port et à 3 200 000 \$ US pour les brise-lames.

Aux Maldives, il existe deux types d'îles artificielles (Walker H.J., 1984), les îles-remblais et les îles-polders.

Les îles-remblais sont constituées par « le remblaiement total de la partie liquide à laquelle on prétend substituer un volume solide dont la face supérieure hors d'eau sera constamment utilisable par l'homme », tandis que, dans le cas d'une île-polder, il faut qu'il y ait « construction d'une digue à la périphérie de la surface convoitée et assèchement du volume liquide ainsi délimité » (Walker H.J., 1984). Les îles-remblais soulèvent deux problèmes majeurs : le remblaiement lui-même et la protection de ce remblaiement contre les éléments extérieurs. Le remblai pratiqué dans l'archipel des Maldives est le remblai endigué : l'étendue à remblayer est ceinturée par une digue dont la partie interne est comblée par des déblais d'origine marine.

Dans l'aménagement de l'île d'Hulhumalé, la technique comporte ainsi plusieurs étapes (cf. Figure 188 - annexe) :

- le pompage des sédiments lagunaires,
- l'assèchement de la zone à remblayer,
- la mise en place d'un réseau de drains et de canaux,
- l'évacuation des eaux afin d'éviter un engorgement du sol,
- l'aplanissement du terrain.

La construction de cette île a été décidée par le chef de l'Etat en 1997 afin d'assurer la survie de la population en cas de submersion (Sinaï A., 2004). Pourtant, entre les logements estimés pouvoir loger 100 000 personnes, un nouvel aéroport, un port et des zones commerciales, l'espace semble peu adapté pour l'accueil d'une population en danger.

Quel que soit le type de remblai utilisé (cf. Figure 189), la vie sous-marine est totalement anéantie sur la zone remblayée et cela sur des échelles spatio-temporelles variées :

Figure 189 : Exemple d'un remblaiement entre les îles de Dhiyamigili et Thinkolhufushi, Atoll de Kolhumadulu (Maldives)



(Mohamed Imad, 2001)



(Mohamed Imad, 2001)

- sur les lieux de l'extraction par l'action brutale des dragues,
- sur un large espace autour de l'île artificielle du fait de l'importance de la quantité des sédiments en suspension qui, en se déposant, asphyxient les coraux.

Afin d'éviter l'augmentation des perturbations sur le milieu côtier, il est indispensable d'effectuer des études préalables sur le choix du site, les quantités à prélever et même l'opportunité d'un tel projet. Si ce cahier des charges est respecté pour les grands travaux étatiques, il ne l'est plus au niveau local. L'aménagement des côtes est alors souvent mal adapté. Par exemple, aucune étude préalable à un équipement, qui peut être la conséquence d'une érosion brutale, n'est effectuée afin d'évaluer les problèmes majeurs qui peuvent survenir une fois le système reconstitué. Ainsi, sur l'île de Niutao, dans l'archipel des Tuvalu, des microfalaises ont été observées entre les villages de Muli et de Kulia. D'après U.L. Kaly (1998), ces érosions sont le résultat de plusieurs événements débutant par une tempête et s'intensifiant par une protection inadaptée, établie précipitamment en avant de l'île de Muli.

Aux Maldives, si les polders et les remblais restent encore sous le contrôle de l'Etat, les constructions littorales telles que ports ou brise-lames... sont effectuées par la population locale. Le constat est malheureusement le suivant : l'érosion à la côte peut rapidement augmenter car l'affouillement des zones infra-littorales a modifié le régime des vagues. C'est ce qui semble s'être passé lors de la construction des remblais lagunaires dans l'île de Fongafale. En effet, la mise en place de ces derniers, ainsi que le déroctage des platiers pour la création de chenaux de navigation, ont eu des répercussions importantes sur le milieu. Les habitants ont vu leurs plages disparaître.

Si, désormais, c'est par le prélèvement de sédiments lagunaires que les Maldiviens créent une île, jusqu'à 1989, ce sont les déchets qui servaient de stabilisateurs, de premiers matériaux avant l'édification d'un remblai. Cette technique était également observable dans les archipels de l'océan Pacifique puisqu'en 1989, aux Marshall, les ponts et les remblais de Majuro ont été réalisés à partir de déchets. C'est donc cette technique qui a été utilisée pour le polder méridional de Malé ainsi que pour sa partie septentrionale (cf. Figure 190). Ce changement radical dans l'utilisation des matériaux a été décidé par la municipalité de Malé après des analyses effectuées sur la lentille d'eau douce de la capitale (U.N.D.P. et U.N.C.H.S., 1989). Il s'est avéré que l'eau n'était plus potable et que de gros problèmes se posaient en terme d'hygiène et de santé publique.

Afin de limiter la pollution dans l'île-capitale, due à l'évacuation des fumées, le gouvernement a décidé de stopper l'utilisation de l'incinérateur à l'air libre installé en 1987.

Cette contrainte environnementale a incité le gouvernement à envisager une nouvelle solution pour traiter les déchets. Il s'agit de l'île-poubelle de Thilafushi (cf. Figure 191 - annexe). Cette île permet non seulement de traiter les déchets par un incinérateur à l'air libre, mais également d'élaborer une nouvelle île par l'accumulation de nouveaux matériaux. Pour les gestionnaires, l'île devait être assez

Figure 190 : Différentes pratiques de remblais



Ile de Goidhoo (Maldives) :
prélèvement sédimentaire lagunaire en
vue de la construction d'une structure
portuaire

Pompage de sédiments lagunaires
pour la construction de l'île
artificielle d'Hulhumalé (Maldives)



Tapis de déchets servant de
soubassement aux anciens polders de
Malé (Maldives) - côte nord-est



L'île poubelle de Thilafushi (Maldives)

proche de Malé pour limiter les coûts de transports, mais suffisamment éloignée pour ne pas lui infliger les désagréments des incinérateurs (pollution de l'air, pollution olfactive...) et ne pas donner une image négative aux touristes de passage. Le faru de Thilafushi a été choisi car il offrait non seulement toutes les conditions requises et la présence d'une petite accumulation sédimentaire naturelle à marée basse constituait une assise à la construction.

La particularité de cette île artificielle vient des éléments qui la composent. Elle est à la fois élaborée à partir de sédiments pompés dans le lagon interne et de gravats issus des constructions de Malé, mais également à partir de l'accumulation des déchets de la capitale. Cette différence de composition varie suivant les parcelles. D'une manière générale, la première assise de l'accumulation est constituée par les gravats auxquels s'ajoutent, suivant les parcelles, différentes couches de déchets (brûlés ou non), puis une couche sédimentaire. La composition du sous-sol peut différer si l'entreprise qui s'installe souhaite avoir une assise plus stable et moins polluée. Ainsi, certaines industries ont des terrains exclusivement sédimentaires comme les compagnies *Maldiva Marine Cement* ou *Maldiva Gaz* qui paient les extractions. Pour les autres industries qui ne souhaitent pas payer d'extractions, leur soubassement est constitué de déchets brûlés qui sont enterrés dans une fosse, située à – 2,5 m par rapport au niveau marin actuel, puis sont recouverts de sédiments lagunaires grossiers. L'investissement initial conditionne donc le soubassement. Des mesures effectuées durant les premières phases de travaux montrent toutefois des taux d'affaissement importants d'un peu plus de 0,4 m la première année et de 0,2 m la seconde année.

Avant même l'implantation des entreprises, les locataires doivent impérativement protéger de l'érosion leur secteur privé de côte. Il s'agit d'une clause obligatoire imposée par les gestionnaires gouvernementaux. Toutefois, il n'est fait aucune mention du type de protection dont doivent bénéficier les côtes. Il peut s'agir de murs verticaux de protection, de gravats disposés anarchiquement, de sacs de sable cimentés... et quelquefois de poubelles.

Peu de personnes vivent sur l'île de Thilafushi, environ 25 à chaque changement mensuel de personnels. Ce sont des commerçants, des manutentionnaires étrangers... L'île se repeuple la journée puisque plus de 50 personnes y travaillent, soit dans le secteur des déchets, soit dans le secteur des remblais, auxquelles il faut ajouter la main-d'œuvre des entreprises présentes sur place.

A la différence de l'île d'Hulhumalé, où la main-d'œuvre peut être maldivienne, sur l'île de Thilafushi, les ouvriers sont indiens, bengalis, sri-lankais... Il faut voir en cela une volonté économique, car il s'agit d'une main-d'œuvre moins coûteuse, mais également idéologique, car les Maldiviens ne souhaitent pas travailler dans un secteur « dégradant ». La gestion des déchets devient pour le gouvernement maldivien un problème crucial, notamment en raison de l'augmentation de la population à Malé. Il dépense annuellement plus de 1,32 milliards \$ US¹⁰⁰ pour cette filière qui relie Malé à Thilafushi. La collecte dans la capitale se fait suivant trois modes : soit par le dépôt individuel

¹⁰⁰ 17 milliards de Rufiya

dans la station de récupération située dans le sud de l'île de Malé, soit par le passage des éboueurs, soit par le dépôt dans des conteneurs entreposés dans la capitale. Les déchets ainsi collectés sont dirigés vers la station de transfert. Là, ils sont chargés dans des camions, quatorze au total, eux-mêmes chargés sur des bacs assurant ainsi des liaisons pluri-journalières avec l'île de Thilafushi. En 2001, d'après les données fournies par l'ingénieur responsable¹⁰¹, le transport journalier oscillait entre 98 et 140 tonnes, 173,4 tonnes d'après la Japan International Cooperation Agency (1999), alors qu'en 1989, la production quotidienne se situait entre 18 et 21 tonnes.

Les ingénieurs ont estimé que le comblement total du faru prendrait cinquante ans, dans l'hypothèse où la population de la capitale demeurerait constante. Or, d'après les estimations, non seulement la population de Malé et de sa ville dortoir Vilingili augmentera, mais le souhait d'installer à terme plus de 100 000 personnes dans la future île d'Hulhumalé risque d'aggraver les problèmes de traitement des déchets. A cela, il faut ajouter les déchets provenant des îles-hôtels et des îles locales proches.

Il est facile d'imaginer que d'autres îles-poubelles vont se créer, notamment dans le nord et dans le sud de l'archipel, si les pôles de développement voulus par le gouvernement (*Regional Development Project*) se mettent en place.

Tableau 15 : Evolution de la production des déchets (industriels et domestiques) transportés sur l'île de Thilafushi, de 1999 à 2003 (Japan International Cooperation Agency, 1999)

Ile	1999	2000	2001	2002	2003
Malé	76 935	113 998	106 707	99 071	103 548
Vilingili	3 300	3 585	3 795	5 005	4 300
Aéroport d'Hulhulé	3 955	5 235	4 215	10 230	3 485
Îles-hôtels ¹⁰²	21 590	22 115	23 925	59 355	27 625
Total	105 780	144 933	138 642	173 661	138 958

8.2. Des littoraux sur-artificialisés

Les littoraux des îles basses semblent concentrer tous les désavantages car ils sont souvent victimes d'une raréfaction des matériaux qui les constituent, d'une augmentation de l'exploitation de leurs ressources, de l'agression d'événements naturels, de l'augmentation de la pression anthropique...

Dans certains cas, le retour à une côte naturelle a été préférée aux artificialisations littorales comme cela a été le cas pour la frange occidentale de l'atoll de Seenu dans l'archipel des Maldives. En effet, les cinq îles présentes sur cette façade, qui avaient été reliées entre elles par un système de routes

¹⁰¹ M. Mohamed Latheef

¹⁰² Toutes les îles-hôtels des atolls de Malé nord, Malé sud, d'Alifu ainsi que certaines de l'atoll de Maalhosmadulu sud (Sonevafushi, Coco palm).

dans les années 1940, ont subi une désartificialisation de leur littoral qui s'est achevée cette année. Ces routes construites par étapes (331 m entre Hithaadhoo et Hankede, 250 m entre Hankede et Maradhoo, 233 m entre Maradhoo et Feydhoo, puis 500 m entre Feydhoo et Gan) ont été rapidement génératrices de perturbations sur le transit sédimentaire entre le lagon et l'océan ainsi qu'au sein du lagon, et ont causé une eutrophisation des eaux lagunaires. Pour y remédier, les aménageurs actuels ont décidé de remplacer les « causeways » par des ponts sur pilotis assurant un échange des eaux entre le lagon et l'océan. Les résultats des premières désartificialisations semblent concluantes et permettent ainsi au gouvernement d'envisager la poursuite de modifications pour d'autres aménagements dans l'archipel.

Les aménagements côtiers (épis, perrés, quais...) posent un certain nombre de problèmes pour les gestionnaires des micro-Etats insulaires, notamment en terme de cohérence, de longévité, de coût... Traditionnellement, aux Tuvalu, on pouvait observer deux types de protection, soit des blocs de corail disposés anarchiquement, soit des arbres morts disposés au niveau de l'étage supralittoral. Depuis peu, des initiatives individuelles se sont multipliées. Ainsi, dans le nord de l'île de Fongafale, un habitant a décidé de dresser un mur de carcasses de voitures afin de lutter contre les vagues lagunaires, d'autres ont rehaussé leur habitation en créant artificiellement des buttes de galets, ou ont construits des murs verticaux pour protéger leur habitation... (cf. Figure 192)

L'intervention d'aménageurs étrangers a introduit un nouveau mode de protection beaucoup plus dommageable pour ces pays en développement, car ils imposaient un prélèvement plus massif de matériaux sur l'espace littoral. La Communauté Européenne est responsable, par exemple, des blocs cimentés disposés sur la côte lagunaire de Fongafale dans les années 1980. Dans les deux cas, ils sont prélevés soit sur le platier externe, soit sur les plages et/ou les petits fonds sédimentaires, imposant ainsi une pression supplémentaire sur le milieu à protéger.

Aux Tuvalu, la protection côtière devient en fait un problème culturel. Comme nous l'avons vu précédemment (cf. Chapitre 7), les parcelles sont extrêmement nombreuses dans l'archipel, et plus particulièrement, dans l'île de Fongafale, posant un problème majeur en terme de protection. Chaque propriétaire a le droit de protéger sa parcelle comme il l'entend, ce qui peut entraîner des déséquilibres dans le système littoral du fait de la multiplication d'ouvrages côtiers incohérents. Ainsi, chaque parcelle est défendue selon les moyens financiers de son propriétaire pouvant causer sur l'ensemble du système des érosions importantes. Régler cela impliquerait de rediscuter la notion d'appartenance des terres situées sur la façade lagunaire et/ou océanique de l'île. Cela pourrait se faire en modifiant les lois concernant la gestion côtière par l'obligation pour l'Etat de protéger de façon uniforme et cohérente l'ensemble des littoraux concernés.

Comme en 1986, le gouvernement souhaiterait instaurer une protection totale de la côte lagunaire de Fongafale. Il s'agit du « seawall project » élaboré par le service de l'équipement de Fongafale et

Figure 192 : Exemples de protections côtières sur les littoraux des îles basses

Protection lagonaire de l'île de Fongafale (Tuvalu)



Ile de Malé (Maldives)

Ile de Fongafale (Tuvalu)



Ile de Funafara (Tuvalu)

intégré au programme d'environnement côtier GEF¹⁰³ qui a pour ambition de protéger l'ensemble du trait de côte lagunaire par l'édification d'un mur de protection d'après le modèle élaboré aux Samoa. Il est envisagé de bétonner le rivage pour protéger les habitants de la montée du niveau de la mer ou des fortes houles. Cette artificialisation se ferait en avant du trait de côte actuel afin de gagner de l'espace sur la mer.

En 1986, l'Union Européenne a financé la construction de digues et de remparts de cordons littoraux sur plusieurs îles de l'archipel tuvaluan. Ces protections ont été édifiées avec des gabions élaborés à partir de débris et de sable coralliens prélevés dans les lagons. Le choix d'utiliser des matériaux coralliens s'est basé sur des données économiques. En effet, lors de la construction, un mètre linéaire de protection, construit à partir de matériaux importés, coûtait 880 \$US, tandis qu'un mètre linéaire, élaboré à partir de corail, ne s'élevait qu'à 180 \$US (Reynolds C., 1988).

Les sites protégés concernaient les îles de :

- Nanuméa : 110 m sur la côte océanique ;
- Nui : construction d'une digue ;
- Vaitupu : 484 m sur la côte lagunaire
- Nukufetau : 330 m de protection sur la côte océanique et 225 sur la côte lagunaire ;
- Funafuti : 2 150 m de côte lagunaire ;
- Nukulaelae : 975 m de côte lagunaire.

Malgré un accord passé avec les protagonistes de l'étude pour un suivi jusqu'en 1991, deux ans après l'édification de ces murs il apparaissait que les protections installées sur les îles de Nanuméa, Nukulaelae et Funafuti n'avaient pas joué le rôle escompté. Elles se sont déchaussées et ont été sapées, ce qui a conduit à la submersion des édifices par les vagues lagonaires et à l'érosion du littoral situé en aval de la protection.

L'approche est donc différente entre les Maldives et les Tuvalu et entre les îles-capitales et les autres îles des archipels. Le choix des systèmes de protection doit s'adapter entre les îles capitales où des systèmes contemporains sont adoptés et les îles locales où des systèmes plus rudimentaires sont préférés, cette dichotomie créant d'importants problèmes d'aménagements.

Il faut, dans une politique cohérente de protection du littoral, envisager que chaque état puisse développer son propre modèle de protection et ne pas se calquer sur les modèles en vigueur comme le « Great wall » américain.

Aux Maldives comme aux Tuvalu, les ouvrages côtiers se font sans une réflexion sur les mesures globales de protection. Quelquefois, les aménagements peuvent même se faire au coup par coup sur des sites et des îles subissant ou non une forte érosion continue des côtes. Ceci est malheureusement

¹⁰³ *Global Environment Facility*

imputable, mais pas uniquement, aux subventions accordées par les organisations internationales. Dans ce cas, les aides accordées à un ministère sont décidées annuellement et doivent être entièrement dépensées, pour être renouvelables chaque année. Ainsi, des travaux importants impliquant des structures lourdes d'aménagement, blocs de béton (cf. Figure 193 - annexe), dynamitage de platiers, etc, peuvent être entrepris pour combattre des érosions qui s'avèreront saisonnières ou annuelles. Les dépenses doivent être dans certains cas si rapides que les reconnaissances de terrain préalables à tout aménagement ne peuvent être réalisées. C'est ce qui s'est passé pour l'île de Thulusdhoo dans l'atoll de Malé nord où une modeste érosion côtière a conduit les aménageurs locaux à édifier en avant du trait de côte des brises-lames. Moins d'un an après, la zone qui s'érodait est restée stable, et s'est même engraisée, mais tout l'espace situé de part et d'autre des brises-lames était en proie à une érosion importante des côtes reconnue par le ministère de l'Environnement lui-même. Un autre facteur ne doit pas être négligé. Il s'agit du stock sédimentaire prélevé, dont le volume est difficile à estimer, mais qui nous apparaît un facteur de perturbations de l'évolution des littoraux.

8.2.1. Les perturbations nées de l'histoire

Lorsque l'on souhaite mesurer les impacts anthropiques sur le milieu littoral corallien, il faut considérer leur type et leur échelle. On oppose alors les usages traditionnels, considérés comme moins perturbateurs, à des usages contemporains, qui le sont plus.

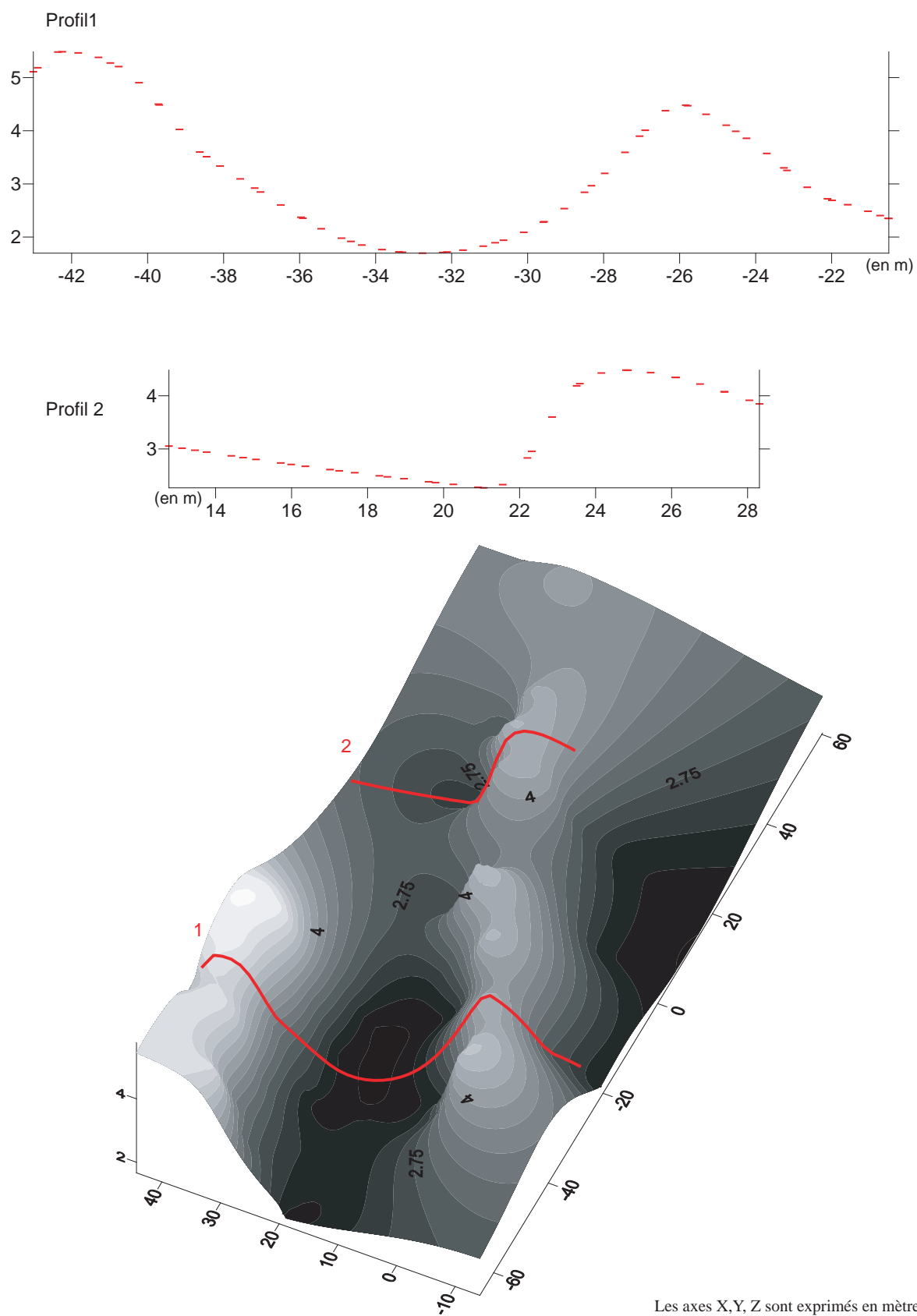
Durant la guerre du Pacifique, plus de 6 000 soldats américains étaient présents aux Tuvalu, dans les atolls et îles de Funafuti, Nanumea et Nukufetau (Roberts R.G., 1958 ; Telavi M., 1983) et, de façon moins massive, sur ceux de Vaitupu et Nui, l'archipel ayant une valeur stratégique du fait de l'occupation des Kiribati-Gilbert par l'armée japonaise.

Il a fallu pour cela aménager les îles afin de les rendre opérationnelles. Les travaux ont été décidés par les gouvernements américain et britannique sans consultation préalable de la population tuvaluane¹⁰⁴. Ainsi, trois aérodrômes ont été construits sur les atolls de Funafuti, Nanumea et Nukufetau, dont seul celui de l'île de Fongafale, opérationnel à la fin de l'année 1942, est encore en service aujourd'hui. Les aménagements ont été nombreux et rapides. Les prélèvements lagunaires n'assurant qu'un apport réduit par rapport aux travaux entrepris, les plus gros prélèvements ont été opérés dans la structure de l'île par le creusement de dix *borrow pits* dans les îles de Fongafale et de Tengako (cf. Figure 194).

La construction d'une aire de stationnement pour hydravions sur la façade lagunaire de l'île de Fongafale a impliqué une poldérisation de l'espace littoral sur plus de deux mètres de large. Le quai de Catalina permettait d'embarquer ou de débarquer le matériel voyageant sur l'eau (bateau ou hydravion). La présence de bateaux au sein du lagon, et au plus proche de la côte, a rendu nécessaire le

¹⁰⁴ Entretien télévisé de M. Saufatu Sopoaga – Premier Ministre des Tuvalu

Figure 194 : Modèle numérique de terrain dans l'île de Tengako (atoll de Funafuti) : exemple d'une île excavée



déroctage d'une partie du platier afin de créer des chenaux de navigation artificiels. Certaines patates lagunaires ont été dynamitées pour l'amerrissage des hydravions. Dans le même temps, la passe sud-sud-est de l'atoll de Funafuti a été également dynamitée afin de faciliter la navigation des navires de guerre. En octobre 1943, on pouvait comptabiliser 43 navires de guerre ancrés dans le lagon, 131 en novembre, 141 en décembre et enfin 174 en janvier 1944.

Les Tuvaluans ont eux-mêmes dynamité leurs platiers afin de sécuriser quelques chenaux de navigation, au sein du lagon ainsi que dans les passes, et cela dès les années 1930. Il s'agissait d'une pratique courante à cette époque puisqu'on a recensé sur huit archipels du Pacifique (Kaly U.L. et Jones G.P., 1994) plus de 200 chenaux creusés artificiellement, comme dans les îles de Nanuméa et de Nuie, respectivement en 1937 et 1934.

Les troupes américaines ont occupé et aménagé, de façon plus légère, les îles d'Amatuku, Fualefeke, Tepuka, Fatato, alors que la population insulaire était déplacée durant les travaux sur les îles de Funafara et Papaelise.

Dans les trois atolls occupés, les aménagements ont réduit inévitablement la surface habitable. Disséminés le long de Fongafale, les *borrow pits* (cf. Figure 195) ont privé les habitants de 52 ha de l'île et souvent de la partie la plus riche des atolls coralliens. Un sixième de la surface de l'île de Nanuméa a été utilisé pour la construction de la piste d'aviation, 22 000 des 54 000 cocotiers existants ont été arrachés afin de sécuriser cette dernière. L'atoll de Nukufetau a été aménagé en espace portuaire. Pour cela, les Américains ont créé l'équivalent d'un port en eau profonde face à l'île de Motulalo, qui abritait également la piste d'aviation et les troupes. Le lagon de Fualefeke servait, quant à lui, de zone d'abri pour les nombreux vaisseaux militaires.

Les travaux d'excavations, de dragage... ont laissé dans le paysage de l'atoll de Funafuti d'importantes cicatrices. Juste après le conflit, les Américains ont versé une compensation aux Britanniques pour le prêt de leur colonie, mais ils n'ont rien reversé en contrepartie au peuple tuvaluan et n'ont entrepris aucun travail de restauration ou de réhabilitation des sites. C'est pour cette raison que les Tuvaluans souhaitent obtenir une aide supplémentaire des Britanniques pour le préjudice qu'ils ont subi. L'atoll de Funafuti porte encore les stigmates de cette guerre par la présence dans le lagon de vestiges de navires, de machines ayant permis la construction de la piste d'atterrissage et d'autres engins militaires laissés tels quels lors du départ des Américains.

Le borrow de Tengako a servi de décharge sauvage aux Américains et est à l'heure actuelle impropre à toute construction ou exploitation. La décomposition des engins est telle que le sol est hyper acide. Lors d'un levé que nous avons effectué dedans, après seulement une heure, nous avions les jambes rouges, brûlées par l'eau et un goût de fer dans la bouche qui nous resta durant toute la journée. Comment peut-on penser y installer des familles ou un complexe touristique, comme cela a pu être envisagé lors de notre dernier séjour en 2001, sans un nettoyage très sérieux du site.

Figure 195 : Le remplissage d'un borrow pit, avant et pendant la marée montante, Île de Fongafale (Tuvalu)



Si les pylônes présents au premier plan sont synonymes d'un abandon d'une construction individuelle, au troisième plan, des habitations ont été construites dans le borrow pit. Noter au second plan, sur la gauche de la photographie, la présence d'arbres indiquant la volonté de remblayer une partie du borrow pit



Comme nous venons de le voir, de tels aménagements nécessitent des matériaux qui sont rares et difficiles à trouver sur une île basse corallienne. Seules trois sources naturelles peuvent en fournir : le lagon, le soubassement de l'île et/ou la côte. Le lagon implique des frais d'extraction très coûteux que les Tuvaluans ne peuvent se permettre d'engager. Les *borrow pits* sont des cicatrices béantes dans l'édifice, qu'ils fragilisent, réduisant l'espace habitable et ayant des conséquences environnementales induites. Les prélèvements côtiers, qu'il s'agisse de galets ou de sable, constituent la première source d'approvisionnement pour la population locale. Seuls, les lieux d'extraction ont évolué du fait d'une raréfaction de la ressource. Après le cyclone Bébé, des tonnes de galets se sont retrouvées aux portes des habitations. Tout le monde venait se servir, les personnes privées comme les administrations, pour construire qui sa maison, qui son parc à cochon, voire une route... Le sable, quant à lui, a été préféré aux galets pour la construction des cubes de protections lagunaires. Une fois que les sources de matériaux les plus proches des zones d'habitations se sont tarées, les zones de prélèvements ont été déplacées. Ainsi, il n'est pas rare de rencontrer, dans l'extrême sud de l'île de Fongafale, là où l'accumulation sédimentaire continue d'évoluer naturellement, des cueilleurs de galets venus récolter les matériaux des futurs aménagements.

Malgré une information sur les dommages d'une telle pratique, les Tuvaluans poursuivent les extractions.

Du fait de l'importance que revêt la notion de terre et de propriété dans cette partie du Pacifique, toutes les zones d'extraction sont des espaces communs comme dans la partie méridionale de l'île de Fongafale où aucun droit de propriété privé ne peut s'appliquer.

Si certains prélèvements peuvent s'effectuer comme aux Tuvalu directement sur les îles, bien qu'ils soient minimes, les grosses extractions aux Maldives se pratiquent sur des farus isolés, non peuplés et proches de l'île principale. Ceci n'est pas pratiqué dans l'atoll de Funafuti qui possède pourtant une quarantaine d'îles ou îlots, ayant des côtes sableuses et/ou à galets. Plusieurs raisons peuvent l'expliquer comme, par exemple, le type de bateaux, l'accessibilité des îles et la propriété.

Bien que le remblaiement des *borrow pits* ait été une des priorités du dernier plan de développement insulaire (Government of Tuvalu, 1995), et fut également celui du plan précédent (Government of Tuvalu, 1988), rien n'a été entrepris. Pourtant, à terme, le comblement des *borrow pits* et des zones humides permettrait une redistribution de la population en optimisant l'occupation de l'espace. Ainsi sur les 52 ha existants, 36 reviendraient à la population, pour la construction de nouvelles habitations et pour le développement de surfaces agricoles. Les 16 ha restants seraient conservés en vue de l'extension de l'aéroport. D'après une étude menée (Demas, 1987), des prélèvements sédimentaires permettraient de combler ces cavités, sans conséquences néfastes pour l'environnement. Pourtant, ce projet consiste à prélever les matériaux sédimentaires nécessaires dans le lagon, suivant des carrés de 50 m x 50 m soit 2 500 m³ de sédiments, à environ 2 km de la côte de Fongafale et à des profondeurs légèrement supérieures à 25 m.

Cette étude montre que le comblement de l'ensemble des *borrow pits* des îles de Tengako et de Fongafale nécessiterait 780 000 m³ de sédiments, fins à moyens, sur une période de sept ans entre les mois de mai et de septembre. Ce projet n'a malheureusement jamais abouti du fait de son coût extrêmement élevé et, bien entendu, des nuisances environnementales qu'il aurait impliquées. D'après des expériences menées par des scientifiques britanniques sur les prélèvements lagunaires, il a été montré que la « ... *creation of lagoon borrow pits alter sediment flow and often increases coastal erosion* » (Aalbersberg B. et Hay J., 1991). Le volume de sédiments nécessaire au remplissage a été largement revu à la baisse puisque Towland (1996 in Kaly U.L., 1999) parle d'un volume total de 423 188 m³, voire de 294 479 m³ car le *borrow pit* nécessitant le plus de matériaux servirait de zone de stockage de déchets. Il serait ainsi comblé par les déchets journaliers de la capitale ainsi que les anciens déchets stockés actuellement dans les autres *borrow pits*. Ce choix estimé comme judicieux par la population permettrait non seulement de réduire la pression sur le lagon due aux prélèvements mais n'impliquerait pas des coûts de nettoyage trop onéreux étant donné son degré de pollution (engins militaires de la Seconde Guerre mondiale en décomposition, présence de batteries et de plastiques). La contrainte de sa reconversion reste toutefois son éloignement par rapport à la capitale, bien que la route puisse rendre cette liaison plus facile. Pour les neuf autres *borrow pits*, le remplissage par les sédiments devra constituer le premier niveau de réhabilitation. Une fois le sol aplani, il faudra développer les plantations d'arbres, jouant le rôle de stabilisateurs du terrain, d'atténuateurs d'embruns et de garde-manger (cocotiers, fruits à pain, pandanus), ou favoriser un développement agricole en amendement le sol, à partir d'apport en produits azotés issus du compostage des déchets verts. Cette reconversion agricole nécessite toutefois de choisir des sites protégés naturellement des aspersions marines pour éviter que les productions ne soient grillées sur pied par le sel, comme ceux de la partie sud de l'île (*borrow pit* 1 et 5) ou ceux de la partie nord (*borrow pit* 4 et 6). La réhabilitation des autres sites par le pompage sédimentaire *ex nihilo* devra être effectuée, autant que faire se peut, dans un respect granulométrique des éléments *in situ* afin de ne pas aller à l'encontre de la création d'une nouvelle lentille d'eau douce.

Le projet de comblement des *borrow pits* s'est heurté à des difficultés. Ne possédant aucune pompe de sédiments, le gouvernement devait faire venir du matériel adapté depuis les Fidji. La puissance énergétique nécessaire pour de tels prélèvements n'est pas disponible sur l'île de Fongafale. Une tentative a été faite en 1999 par la SOPAC, mais les limites des moyens disponibles n'ont pas permis d'assurer le succès de l'opération. La quantité de sédiments nécessaires au comblement était trop importante et le système de pompage n'était pas assez puissant pour les ramener d'une façon optimisée à la côte.

Sans une totale prise en charge financière, de tels travaux ne sont pas envisageables pour un pays en développement comme les Tuvalu. C'est peut être en cela que l'aide internationale est primordiale et

légitime. Certaines de ces zones ont été partiellement remblayées par des matériaux divers trouvés sur l'île, comme les déchets journaliers ou les déchets verts, notamment dans trois des dix *borrow pits* des îles de Fongafale-Tengako.

Certaines de ces zones sont insalubres et peuvent être dangereuses pour la santé publique. Il n'est pas rare d'observer, durant les périodes de grande marée de vive eau, les déchets flotter à leur surface alors que les membres d'une famille s'y baignent. D'autres, notamment celles du nord-ouest de la piste d'atterrissage, sont bordées par des dizaines de cages à cochons qui permettent aux excréments d'être évacués. Or, là encore, à grande marée, les enfants se baignent sans se soucier des conditions d'hygiène.

8.2.2. Les extractions : la pratique du mining

L'utilisation du corail comme matériau de construction (habitations, routes...) est une pratique courante dans les archipels insulaires, comme aux Tuvalu ou aux Maldives, où il est le seul matériau disponible.

Aux Maldives, on a pu retracer son utilisation sur plus de deux siècles. Initialement, le corail, exclusivement composé de coraux massifs, était destiné aux seuls monuments religieux (mosquées, tombes...), car, traditionnellement, les habitations des îles locales étaient faites de feuilles de cocotiers ou de pandanus (ou tout autre bois). Ceci s'observait également dans l'archipel tuvaluan où seul le représentant de la Grande-Bretagne possédait une maison en corail ; les habitants édifiaient, quant à eux, des maisons, sur un ou plusieurs étages, avec des feuilles de pandanus.

L'extraction du corail était trop onéreuse pour de simples communautés villageoises. Pourtant, on retrouve dans les récits de Moresby (1835) une référence concernant l'utilisation du grès de plage par les habitants des atolls de Noonu et de Shaviyani pour la construction des habitations. Au début du XX^e siècle, le corail (coraux massifs et branchus) et le sable corallien ont commencé à être extraits à des fins immobilières, d'abord sur l'île de Malé, puis à partir des années 1950 sur les autres îles de l'Etat (Ali M., 1991). D'autres auteurs (Asian Development Bank, 1998) situent l'essor de la demande au début des années 1970, lorsque la pêche mécanisée a été introduite dans les îles locales et a permis un développement économique accéléré.

La population insulaire a progressé rapidement et, avec elle, la construction de maisons en corail qui est devenue dès cette époque très populaire. Elle était un indicateur du statut social d'une famille, ce qui n'est plus le cas à l'heure actuelle. Les quatre-vingts dernières années ont été particulièrement dommageables pour le milieu car la pratique s'est accélérée du fait d'une forte croissance de la population locale, puis étrangère. En effet, le développement touristique à partir des années 1970 a eu comme conséquence une augmentation significative des besoins en matériaux coralliens. Non

seulement, on utilise le corail pour édifier les murs extérieurs, mais la chaux de corail sert également de liant pour cimenter les morceaux entre eux.

A l'heure actuelle, les populations villageoises utilisent du corail dans la construction de leurs maisons (cf. Figure 196) car ils considèrent ces matériaux comme plus résistants, bien que des blocs bétonnés soient plus économiques, plus adaptés à l'environnement, et font gagner un temps considérable dans la construction (Sluka R. et Miller M.W., 1998).

Il a été estimé qu'un mètre carré de mur nécessite 32 m³ de corail brut et seulement 20 m³ de sable corallien dans le cas de blocs bétonnés (Macalister Elliott Et Partners Ltd., 2001), alors que, pour d'autres, la construction d'une maison maldivienne moyenne localisée sur les îles locales requiert 10 m³ d'agrégat corallien (Naseer A., 1996) ou entre 50 m³ et 80 m³ si l'on considère les dépendances (Ministry of Economic Affairs. et Unep, 1989), soit environ 10 m³ par personnes. Ce qui laisserait envisager pour l'ensemble de la population de l'archipel des besoins coralliens situés autour de 3 218 440 m³ pour la seule construction d'une maison, qui pourrait subir des travaux de réfection nécessitant 160 922 m³ de matériaux supplémentaires au bout d'une vingtaine d'années. A cela, nous pouvons ajouter les besoins en matériaux coralliens pour la construction de routes, d'immeubles, de ports, de polders... dont les besoins ont été estimés autour de 1 m³/an pour les habitants des îles locales et 5 m³/an pour ceux de Malé. Sans oublier les besoins des 87 structures hôtelières estimés aux alentours de 174 000 m³/an. Ainsi, pour l'année 2001, d'après des estimations basses, les besoins coralliens ont été considérés comme tels :

- 370 345 m³ pour Malé,
- 121 963 m³ pour les îles locales,
- 174 000 m³ pour les structures touristiques,

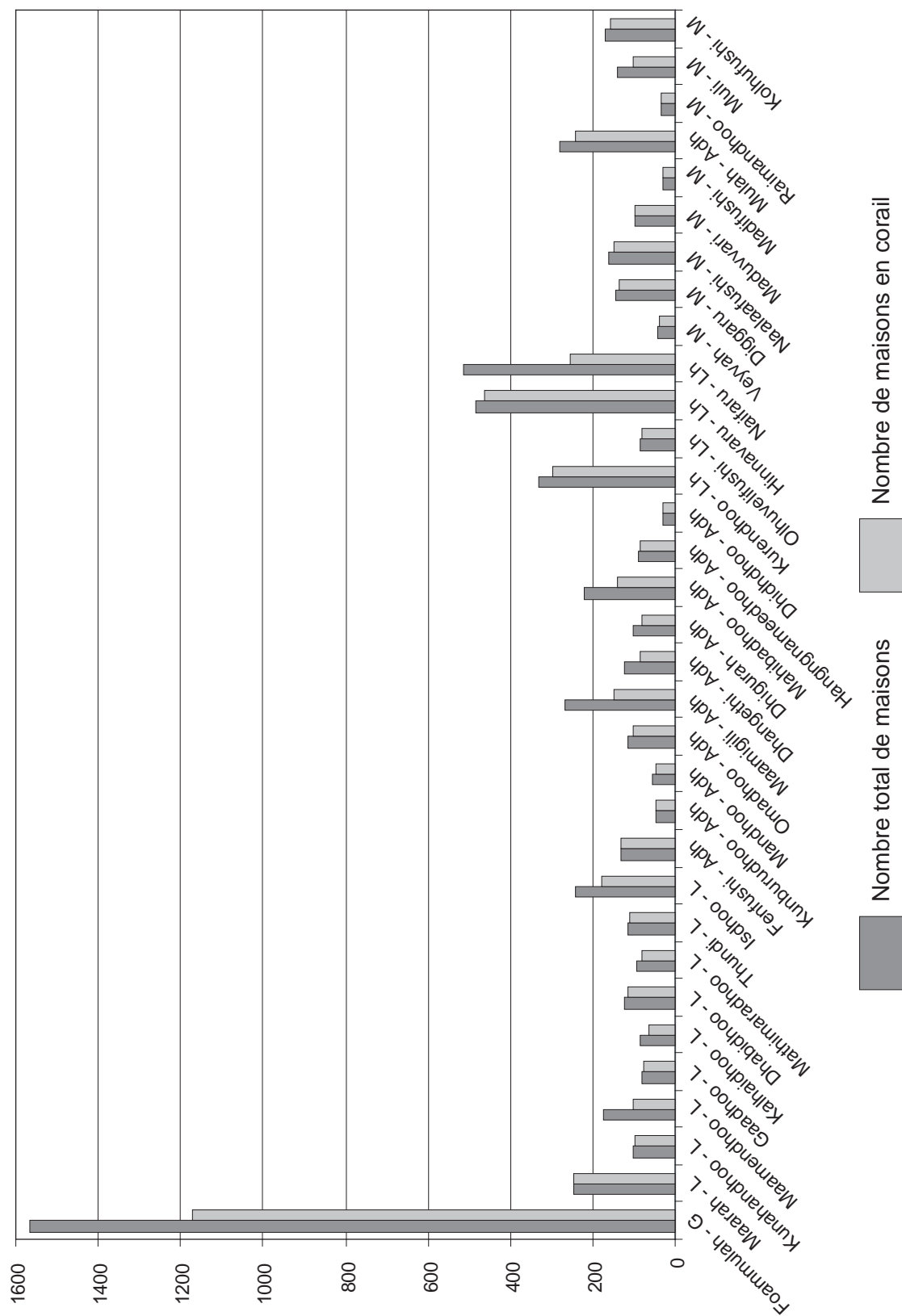
soit un total de 666 308 m³/an prélevés dans les structures atolliennes. Il s'agit d'une estimation basse car, en 1989, le volume total oscillait déjà autour d'1 million de m³ (Ministry of Economic Affairs. et Unep, 1989).

La pression sur les récifs coralliens est très importante dans l'archipel des Maldives. Il a été estimé qu'à la fin de la décennie 1980, la construction et l'entretien des routes de la capitale avaient nécessité 43 000 m³ de corail (Brown B.E. et Dunne R. P., 1988), 42 000 m³ si l'on considère des données plus récentes (Mallik T.K., 1999) et qu'en proportion, la collecte dans chaque île locale représente 1 829 m³.

Les quantités prélevées changent selon les auteurs. Ainsi, si certains (Mallik T.K., 1999) considèrent qu'en treize ans, on a extrait dans l'atoll de Malé environ 93 446 m³ de corail, tandis que d'autres (Ministry of Construction and Public Works, 1999a) chiffrent les extractions aux alentours de 111 000 m³.

D'après une estimation (Brown B.E. et Dunne R. P., 1988), le nombre de matériaux disponibles dans l'atoll de Malé est de 610 000 m³ dont 200 000 m³ se situent dans un rayon de 16 km autour de la

Figure 196 : Proportion du nombre de maisons construites avec des éléments coralliens dans les îles locales de l'archipel maldivien



capitale. Ces auteurs considèrent que l'exploitation d'un faru de 600 m de diamètre, avec une couronne de 60 m de large, permettrait d'extraire, sur quinze mètres de profondeur, environ 1,5 millions de m³ de matériaux. Si, par contre, il est exploité jusqu'au plancher lagunaire central, qui est considéré à 45 m de profondeur, les quantités prélevées seraient de 10 millions de m³. Ceci impliquerait en terme environnemental l'éradication totale d'un faru, mais, en terme commercial, un approvisionnement continu pour l'industrie de la construction sur des centaines d'années (Brown B.E. et Dunne R. P., 1988 ; Mallik T.K., 1999). D'une utilisation exclusivement coutumière, l'extraction des agrégats coralliens est désormais devenue une source de revenus pour certains habitants des îles locales.

Il convient de noter que le Ministère des constructions et des Travaux Publics réglemente toute action ayant un impact sur la biodiversité récifale comme l'exploitation corallienne, le dragage des récifs, le remblaiement des platiers...

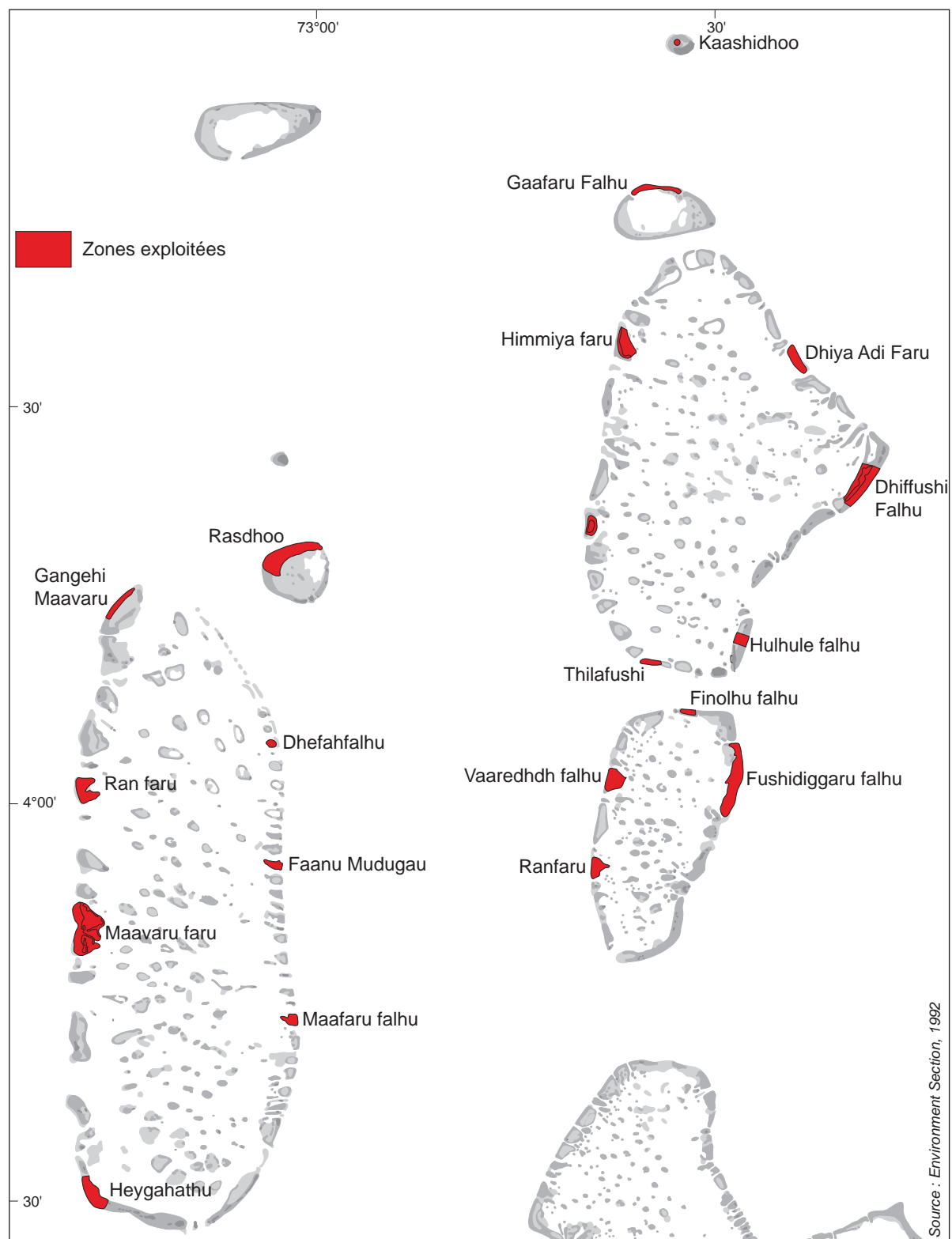
8.2.3. Les différents matériaux issus de l'extraction

Les farus qui sont les espaces privilégiés pour la pratique de l'extraction ont l'avantage d'être constitués des deux grandes espèces coralliennes, les massives et les branchues, qui ont toutes deux leurs spécificités. Si les sites d'exploitation ont été pendant longtemps des farus localisés au sein des atolls, ils se situent désormais sur les bordures des méga atolls. L'extraction se pratique préférentiellement à marée basse lorsque la couronne est émergée, mais peut également se poursuivre durant la remontée car le marnage y est faible. Les zones d'extraction sont clairement délimitées au sein des Plans Nationaux de Développement (cf. Figures 197 et 198 - annexe). Dans ce but, les mineurs professionnels choisissent un site d'exploitation suivant deux critères majeurs : sa profondeur et sa distance par rapport à leur île d'origine, afin de réduire le temps et les frais de transport. Par exemple, les mineurs de l'île de Dhidhdhoo (Haa Alif) ont extrait les matériaux nécessaires à la construction de leur port et d'une zone poldérisée annexe sur les farus de Mathi faru et Gallandhoo respectivement dans les atolls d'Haa alif et d'Ihavandhippolhu. De mars 1995 à janvier 1999, ils y ont prélevé plus de 1 214 m³ de corail.

8.2.3.1. L' extraction de blocs coralliens

Elle se pratique dans des zones peu profondes, généralement un mètre, sur les bordures des couronnes coralliennes. Le débitage des récifs commence sur les premiers cinquante centimètres du récif sur l'ensemble de la zone à exploiter. Les mineurs équipés d'un simple masque et tuba détruisent les coraux à coup de barre de fer, en morceaux suffisamment petits pour être facilement manœuvrables. Ils sélectionnent préférentiellement les espèces massives comme les *Porites*, les *Goniastrea*, les

Figure 197 : Zones recommandées pour l'extraction du corail et du sable corallien dans les atolls centraux



Platygyra, aux dépens des coraux branchus. Ces derniers sont, quant à eux, utilisés pour l'édification des brise-lames et des épis dans les îles-hôtels (Clark S. et Edwards A. J., 1999). On estime d'ailleurs à 10 m³ la quantité de coraux nécessaire à la construction d'un épi¹⁰⁵ (Brown B.E. *et al.*, 1990). Les morceaux de coraux massifs extraits sont chargés dans un dhoni jusqu'à leur île d'emploi. Une fois sur place, ils vont être entassés et laissés à l'air libre sous la pluie et le soleil afin d'être lessivés, dessalés et débarrassés de toutes leurs impuretés avant d'être taillés (cf. Figure 199).

Dans le cas d'une construction de maison, les blocs sont cassés en rectangle de 10 à 20 cm de côté. Les éléments issus de ce débitage sont mélangés à une espèce corallienne particulière, la corne de cerf, et vont être disposés dans un four, creusé à même le sol, où le feu est maintenu durant plusieurs jours. Le produit fini, de la chaux, permet d'assurer le lien entre les éléments taillés afin d'assurer le maintien de la construction et son étanchéité. Si cette pratique est encore utilisée dans certains archipels, comme aux Tuvalu, aux Maldives, l'utilisation du ciment l'a supplantée, bien que son coût soit plus élevé.

Une autre technique, bien plus destructrice pour l'écosystème récifal, est le dynamitage des platiers et/ou des couronnes coralliennes. D'après le personnel du ministère de l'Environnement des Maldives et les îliens interrogés lors de notre enquête, cette pratique est théoriquement interdite par le gouvernement, bien qu'elle soit largement utilisée dans les îles locales. Nous avons pu ainsi assister au dynamitage du platier de l'île de Goidhoo en vue de la construction du port. Une fois dynamité, le platier libérant suffisamment de matériaux non seulement pour l'assise du port, mais également pour les aménagements insulaires futurs...

Certaines îles ont totalement interrompu le prélèvement corallien sur leurs bordures récifales au détriment de farus voisins. Des îles comme Didhdhoo, dans l'atoll d'Haa Alif, ou Kulhudhuffushi, dans l'atoll Haa Dhall ont encore d'importantes demandes en matériaux que les mineurs contentent en excavant les matériaux de farus ou d'îles voisines. D'après E. MacAlister et Partners (2001), l'extraction se fait à la commande, ce qui n'implique aucun profit et aucune destruction gratuite.

Tableau 16 : Evolution des extractions de blocs coralliens (en m³)

	1980 - 1985	1986 - 1990	Total 1980 - 1990
Ile de Malé	65,84	29,87	95,71
Atoll de Malé	34,83	27,47	62,30
Atoll d'Ari	20,10	29,73	49,84
Autres atolls	158,86	204,45	363,31
Total	279,63	291,52	571,15

d'après Binnie et Associés, 1991

¹⁰⁵ Les épis font généralement 10 m x 1 m x 1 m

Figure 199 : Différents prélèvements et usages de matériaux coralliens



Ile de Goidhoo (Maldives) - prélèvement sableux insulaire



Ile de Fongafale (Tuvalu) - stockage de galets coralliens pour une utilisation personnelle



Matériaux extraits par dynamitage (Maldives)



Ile de Goidhoo (Maldives) - maison traditionnelle en corail



Ile de Thulusdhoo (Maldives) - construction actuelle

Tableau 17 : Estimation des besoins en blocs coralliens (en m³)

	1991 - 1995	1996 - 2000	2001 - 2010
Ile de Malé	4,96	4,42	2,66
Atoll de Malé	4,11	3,09	3,09
Atoll d'Ari	8,92	9,32	5,86
Autres atolls	53,66	60,26	34,97
Total	71,64	77,08	46,58

d'après Binnie et Associés, 1991

Signalons incidemment qu'à des degrés moindres, le corail est également utilisé pour la bijouterie locale, comme par exemple le corail rouge, seul le corail noir étant interdit à l'exportation.

Désormais inutilisé dans l'archipel tuvaluan, ce mode d'extraction des blocs coralliens a été très largement pratiqué par les troupes américaines. Après leur départ précipité de 1945, les Tuvaluans ont collecté dans les chantiers d'extraction ou de travaux publics des quantités très importantes d'explosifs qu'ils ont utilisées non seulement pour dérocter le platier mais également pour la pêche.

Pour compléter ce chapitre, ajoutons que les prélèvements coralliens sur le platier récifal externe peuvent avoir des conséquences sur les accumulations sédimentaires situées en aval comme cela s'est avéré être le cas dans l'île de Rihiveli (Rufin C., 2002).

Il ne s'agit aucunement d'une spécificité liée à nos deux terrains d'étude car nombreux sont les travaux évoquant le problème des prélèvements d'agrégats coralliens sur les littoraux tropicaux (Howorth R. et Radke B., 1987 ; Byrne G., 1991 ; Smith R., 1995 ; Chew R.T., 1999 ; Xue C., 2001 ; Lewis J.B., 2002).

8.2.3.2. L'extraction sableuse

Ce type d'extraction se pratique aux Maldives sur des fonds meubles peu profonds, situés entre 3 et 5 m, à l'aide d'un sac en toile de jute pouvant contenir jusqu'à 50 kg. Immergé sur le fond, il collecte le sable suivant le même principe qu'une drague. Une fois plein, le sac est ramené à bord du dhoni et est expédié vers les îles. Il est admis qu'un dhoni utilisé pour cette extraction traditionnelle peut contenir entre 200 et 300 sacs par jour de matériaux extraits.

Rapportés sur l'île, les sacs de sable sont vidés sur le haut de plage pour le séchage. Une fois sec, le sable est mélangé à du ciment, suivant un ratio ciment-sable qui oscille entre un pour cinq et un pour neuf, pour la construction de blocs ou pour le remplissage des sacs de protection. Ces techniques sont utilisées par les îles locales qui assurent elles-mêmes leurs constructions. Pour les grands travaux

étatiques, comme nous avons pu le lire précédemment, il existe la pompe de sédiments lagunaires qui est un système rapide mais trop onéreux pour les îles locales.

Tableau 18 : Evolution des extractions de sables coralliens (en m³)

	1980-1986	1986 - 1990	Total 1980 - 1990
Ile de Malé	88,86	119,44	208,30
Atoll de Malé	33,92	25,63	59,55
Atoll d'Ari	15,74	24,86	40,60
Autres atolls	128,02	165,60	293,62
Total	266,55	335,53	602,07

d'après Binnie et Associés, 1991

Tableau 19 : Estimation des besoins en sables coralliens (en m³)

	1991 - 1995	1996 - 2000	2001 - 2010
Ile de Malé	39,64	67,96	83,76
Atoll de Malé	6,06	6,37	8,41
Atoll d'Ari	7,65	11,55	11,27
Autres atolls	50,57	68,30	77,79
Total	103,92	154,19	181,23

d'après Binnie et Associés, 1991

Bien que certaines îles en aient interdit la pratique, l'extraction de sable est très courante dans l'ensemble de l'archipel que ce soit pour des usages commerciaux ou privés. Le lieu de l'extraction a toutefois été mieux déterminé puisque, désormais, les mineurs ne sont théoriquement plus autorisés à prélever sur leurs plages ou avant-plages, mais sur des sites inhabités définis préalablement. Malgré cela, nous avons pu observer sur quelques îles locales des trous de prélèvement à même les plages (cf. Figure 00). De plus, les réponses apportées par certains chefs d'îles à notre questionnaire ne laissent aucun doute quant à sa pratique. Dans les îles de Feydhoo et de Maradhoo, dans l'atoll d'Addu, l'extraction mensuelle a été estimée à 6 000 sacs de sable, alors que, pour les îles d'Hithaadhoo et Maradhoo-Feydhoo, la collecte se situe autour de 2 000 sacs de sable par mois. Les prélèvements mensuels effectués sur leurs plages ont été :

- de 100 000 à 300 000 kg pour des sacs ayant une contenance de 50 kg ;
- de 50 000 à 150 000 kg pour des sacs ayant une contenance de 25 kg.

Le poids est une indication mais ne reflète en rien la réalité car le sable prélevé peut être mouillé, l'espace inter granulaire plus ou moins grand, la granulométrie des sédiments différente suivant les endroits prélevés....

D'après les dernières études menées (Macalister Elliott Et Partners Ltd., 2001), il est estimé que d'ici à 2010, la demande en sable aura considérablement augmenté, et elle se chiffrera pour la seule province nord entre 35 000 et 40 000 m³.

8.2.3.3. L'extraction des fragments coralliens : les Akiri

Ils sont généralement extraits manuellement des plages océaniques bien que, lorsque la quantité et la morphologie le permettent, la benne soit utilisée. Les îles qui n'en possèdent pas les achètent ou exploitent des îles inhabitées voisines. Il s'agit donc d'un gros marché commercial pour l'archipel. Certaines îles, comme par exemple les îles de Kulhudhuffushi et Dhidhdhoo, respectivement dans les atolls de Haa Dhaal et Haa Alif, sont très demandeuses car elles combinent à la fois une grande demande et des ressources limitées. Si, dans l'archipel sud, la pratique est officiellement interdite, elle reste officieusement tolérée par les autorités insulaires sur les îles inhabitées de l'atoll d'Addu.

Il est admis que ce type de prélèvement peut avoir un impact sur l'érosion côtière, mais « l'impact doit être saisonnier et difficilement quantifiable » (Macalister Elliott Et Partners Ltd., 2001).

Tableau 20 : Evolution des extractions de fragments coralliens (en m³)

	1980 - 1986	1986 - 1990	Total 1980 - 1990
Ile de Malé	14,02	24,78	38,79
Atoll de Malé	7,62	5,13	12,74
Atoll d'Ari	2,52	3,88	6,40
Autres atolls	18,35	23,84	42,19
Total	42,50	57,62	100,13

d'après Binnie et Associés, 1991

Tableau 21 : Estimation des besoins en fragments coralliens (en m³)

	1991 - 1995	1996 - 2000	2001 - 2010
Ile de Malé	7,99	18,92	24,41
Atoll de Malé	1,47	1,78	2,46
Atoll d'Ari	1,53	2,75	3,03
Autres atolls	10,22	14,95	21,61
Total	21,21	38,37	51,51

d'après Binnie et Associés, 1991

Il existe dans l'archipel un quatrième type d'extraction, il s'agit du *veli*. C'est une fraction sédimentaire comprise entre le sable et les fragments coralliens que l'on trouve sur les plages océaniques. Très utilisé dans le sud de l'archipel, il voit son commerce se développer dans le nord à l'occasion du Ramadan puisque la population l'utilise pour décorer l'extérieur de la maison. Bien qu'aucune donnée officielle n'existe quant à la quantité prélevée par la population, il est dit que son

extraction sur les côtes océaniques de l'île d'Hithaadhoo, dans l'atoll d'Addu, a contribué à l'érosion de ses plages (Macalister Elliott Et Partners Ltd., 2001). Depuis son succès, et pour remédier à une extraction trop brutale, les chefs de villages ont institué une taxe à l'exportation pour les non-résidents qui viennent le prélever : ainsi, un sac de *veli* coûte par personne 50 laaris¹⁰⁶.

Quel que soit le prélèvement effectué sur une île inhabitée et/ou sur un faru, l'acheminement se fait par dhoni, ce dernier pouvant généralement contenir 60 m³ de blocs de corail. Il a été estimé qu'un dhoni pouvait être rempli par un groupe de mineurs travaillant pendant huit heures sur un même site (Naseer A., 1996).

Tableau 22 : Recensement du nombre de dhonis lié au secteur de l'extraction sédimentaire

Iles/atolls	1985	1990
Vaadhoo - R	1	1
Ugoofaaru - R	1	1
Innamaadhoo - R	1	1
Dhiffushi - K	1	1
Maafushi - K	1	1
Feridhoo - A	1	1
Omadhoo - A	1	1
Fenfushi - A	14	15
Maamigili - A	20	25
Biledhdhoo - F	11	15
Magoodhoo - F	8	10
Dharaboodhoo - F	5	5
Nilandhoo - F	10	15
Total	75	92

Comme pour le marché des extractions, le prix du transport par dhoni a augmenté en même temps que la pratique s'est démocratisée et que l'activité touristique s'est développée. Ainsi, en 1972, un dhoni plein coûtait environ 100 Rf¹⁰⁷ (7 €, 800 Rf (58 €), en 1981 il atteignait jusqu'à 1 998 Rf (145 €). Désormais, les îles-hôtels emploient leurs propres mineurs et peuvent ainsi garantir les prix du marché et apporter les quantités nécessaires pour leurs constructions. Dans le même temps, un organisme étatique (*Port Commission and Public Works Department*) a fixé le prix d'un dhoni plein à 800 Rf (58 €), et a institué un contrôle des cargaisons, ce qui a causé de nombreuses tensions entre les mineurs et le gouvernement lors de la construction des brise-lames d'Hulhulé qui nécessitait des quantités importantes de matériaux, nettement supérieures aux normes étatiques. En 1991, un dhoni plein coûte entre 1 000 Rf (69 €) et 1 200 Rf (82 €), alors que l'extraction de blocs de corail varie entre 5 Rf (0,34

¹⁰⁶ Ce sont les centimes de Rufiya, environ 3,5 centimes d'euros

¹⁰⁷ 1 \$US : 11, 72 Rf – la monnaie est restée stable jusqu'en 2000.

€) et 5,7 Rf (0,39 €) pour 28,3 dm³ soit un m³ pour 12,0 € et 13,8 €. En 1995, les tarifs sont multipliés par deux (Naseer A., 1996) puisque l'extraction revient entre 10 Rf (0,69 €) et 14 Rf (0,96 €), soit un mètre cube compris entre 24,38 et 33,92 €. Sur l'année 1991 (Naseer A., 1996), il a été estimé que cela rapportait à l'ensemble des mineurs 250 000 Rf (1733 €).

En 1996, les prix évoluent suivant le marché et oscillent entre 66 Rf (4,58 €) et 220 Rf (15,29 €) par dhoni. Etant donné la proximité des sites d'exploitation par rapport aux îles habitées, les prix sont fixés localement.

Tableau 23 : Prix pratiqués par différentes îles de l'archipel pour le prélèvement corallien

Îles / Atolls	Coût par Dhoni¹⁰⁸
Dhidhdhoo – Haa Alif	31,8 € - 44,51 €
Kulhudhuffushi – Haa Alif	63,58 € - 76,33 €
Kurendhoo - Lhaviyani	19,07 €
Hinnavaru - Lhaviyani	73,13 €
Maamigili – Alif Dhaal	95,40 €
Mahibadhoo – Alif Dhaal	95,40 €
Dhidhdhoo – Alif Dhaal	6,35 €
Diggaru - Meemu	14,30 €
Naalaafushi - Meemu	28,61 €
Muli - Meemu	31,80 €
Kolhufushi - Meemu	31,80 €
Mulah - Meemu	95,40 € (sable) et 12,71 € (corail)
Raimandhoo - Meemu	6,35 €
Maduvvari - Meemu	6,35 €
Madifushi - Meemu	12,71 €
Maarah - Laamu	12,71 €
Gaadhoo - Laamu	6,35 €
Dhabidhoo - Laamu	63,58 €
Foammulah - Gnaviyani	6,35 € (camion)

8.2.4. Pratiques interdites ou tolérées ?

Les réglementations strictes semblent être parfois bafouées. Ainsi, lors d'une visite de terrain effectuée sur l'île de Vilingili en 2001, nous avons pu assister à des prélèvements coralliens de la couronne récifale par plusieurs mineurs.

¹⁰⁸ Les réponses aux questionnaires sont arrivées en 2002. A cette période, 1 \$US : 12,80 Rf.

Si les farus sont donc les sites privilégiés pour l'extraction des coraux, des normes strictes d'exploitation ont été instituées depuis la fin des années 1980 afin de sauvegarder, autant que possible, les plus vulnérables (Brown B.E. et Dunne R. P., 1988) :

- 60 farus sont exploités dont 20 dans un rayon de 16 km autour de la capitale ;
- la taille moyenne doit être de 600 m de diamètre avec une couronne de 60 m de large ;
- au moins 50 % de la couronne doit être constituée de récifs vivants ;
- le débit autorisé est de 0,3 m³/m².

Pendant longtemps, l'exploitation du sable et du corail était gérée par des mineurs professionnels issus principalement des îles de Fenfushi et de Maamigili dans l'atoll d'Ari. Ils travaillaient sous contrats avec différents clients comme l'Etat, l'île de Malé, les îles-hôtels, ainsi que certaines îles locales.

Tableau 24 : Nombre de mineurs professionnels entre 1985 et 1990 (d'après Binnie et Associés, 1991)

Îles/atolls	1985	1990
Vaadhoo - R	6	6
Ugoofaaru - R	6	6
Innamaadhoo - R	6	6
Dhiffushi - K	6	6
Maafushi - K	6	6
Feridhoo - A	6	6
Omadhoo - A	6	6
Fenfushi - A	84	90
Maamigili - A	120	150
Biledhdhoo - F	66	90
Magoodhoo - F	48	60
Dharaboodhoo - F	30	30
Nilandhoo - F	60	90
Total	450	552

A l'heure actuelle, le nombre de mineurs a considérablement augmenté. Si, dans certaines îles, les permis de mineurs sont délivrés à un nombre bien déterminé de professionnels, dans la plupart des autres ce sont des mineurs occasionnels qui sont recrutés pour des travaux communautaires.

Tableau 25 : Acteurs des extractions coralliennes pratiquées dans l'archipel, d'après des exemples pris depuis le nord jusqu'au sud des Maldives

Îles - Atolls	Nombre de mineurs	Nombre de dhonis
Baarah - Haa alif	10	
Filladhoo - Haa alif	occasionnels (~ 8)	
Kelaa - Haa alif	6 - 10	
Dhidhdhoo - Haa alif	6 - 12	2 - 3
Kulhuduffushi - Haa dhaal	occasionnels	4 - 8

Nolhivaram – Haa dhaal	18 - 36	
Nolhivaramfaru – Haa dhaal	occasionnels	3
Hanimadhoo – Haa dhaal	occasionnels (8)	
Kurendhoo - Lhaviyani	15	8
Hinnavaru - Lhaviyani	20	4
Fenfushi – Alif Dhaal	occasionnels	10
Kunburudhoo – Alif Dhaal	30	
Mandhoo – Alif Dhaal	occasionnels	
Omadhoo – Alif Dhaal		20
Maamigili – Alif Dhaal		3 - 4
Dhangethi – Alif Dhaal	12	
Dhidhdhoo – Alif Dhaal	20	2
Dhigurah – Alif Dhaal	occasionnels	
Hangngameedhoo – Alif Dhaal	occasionnels	
Mahibadhoo – Alif Dhaal	30	5
Veyvah - Meemu		
Diggaru - Meemu	10	3
Naalaafushi - Meemu	8	2
Muli - Meemu	10	4
Kolhufushi - Meemu		1-2
Mulah – Meemu	10	2
Maduvvari - Meemu		2
Madifushi - Meemu	10	2
Raimandhoo - Meemu		2
Maarah - Laamu	10	2
Kunahandhoo - Laamu		
Mamendhoo - Laamu	occasionnels	
Gaadhoo - Laamu		20
Kailhadhoo - Laamu		12
Dhabidhoo - Laamu		2
Mathimaradhoo - Laamu		
Thundi - Laamu		
Isdhoo - Laamu		2 camions/j
Foammulah - Gnaviyani	70	
Hithadhoo - Seenu	20	4
Maradhoo - Seenu	9 + 9 (<i>veli</i>)	3
Maradhoo-feydhoo - Seenu	8 - 10	2
Feydhoo - Seenu	8	2

En février 1990, une lettre écrite par le Président de la République des Maldives impose que les travaux entrepris sur les récifs des îles habitées soient instamment stoppés. En cas de dommages observés, des ministères¹⁰⁹ sont chargés de constater les infractions et de rechercher les coupables. Des autorisations pourront être accordées à ceux qui souhaitent exploiter les récifs des îles inhabitées mais sous la surveillance d'un membre du bureau d'atoll. Si l'autorisation est accordée, le dynamitage du récif se pratiquera jusqu'à un mètre en dessous du niveau de base récifal.

Il est également fait mention que la construction de murs en corail séparant les propriétés devra être interdit. En octobre 1990, une nouvelle lettre précise que l'interdiction d'exploitation des récifs concerne uniquement les bordures récifales et les platiers situés au plus proche des îles habitées, mais autorise de nouveau la construction des murs de propriétés en corail. En 1991, le gouvernement prend conscience que, sans une interdiction stricte, la pratique se poursuivra. Un projet de loi est élaboré en 1993, conjointement avec le ministère de l'Environnement et le Centre de Ressource Marine (M.R.C.), pour être finalement refusé en mars 2000. Depuis, le texte est examiné par le ministère des Pêches, de l'Agriculture et des Ressources Marines, laissant libre cours aux différentes pratiques d'extraction. D'après les réponses faites à notre questionnaire, chaque île semble instituer sa propre réglementation quant aux prélèvements d'éléments coralliens (sable, galets, corail...). Ainsi, si la pratique est prohibée depuis 1995 dans l'atoll d'Addu, les insulaires extraient cependant les éléments coralliens dès qu'ils en ont besoin. Il faut avouer que la législation officielle est ambiguë car, suivant le type d'île, elle change. Lorsque l'on souhaite extraire des éléments coralliens dans l'atoll de Malé nord, l'autorisation doit être demandée au ministère des Travaux Publics ; par contre, pour les autres îles locales habitées, l'acceptation d'un prélèvement est accordée par le chef d'île après acceptation du chef d'atoll. Le représentant du gouvernement sur les îles a la charge d'estimer la quantité de corail nécessaire aux travaux, de s'assurer qu'elle est bien respectée et de consigner toutes les quantités prélevées.

Pour ce qui est des travaux entrepris au sein d'une île-hôtel, toutes les autorisations doivent être, en théorie, examinées préalablement par le ministère du Tourisme à Malé.

Pour les récifs des îles inhabitées, c'est le ministère des Pêches, de l'Agriculture et des Ressources Marines qui accorde les autorisations, bien que, dans la pratique, il s'avère que le ministère est souvent prévenu une fois que les travaux ont été achevés. A l'exception de certains récifs connus pour être des frayères, tous les autres peuvent être exploités.

Certaines îles ont souhaité développer leur propre réglementation dans la pratique du prélèvement sédimentaire. Ainsi, dans l'île de Baarah, atoll de Haa Alif, les collectes sont comptabilisées afin d'assurer un suivi de la ressource et un contrôle des prélèvements. Pour limiter l'érosion côtière, la population a imposé que les sédiments collectés sur les plages le soient à une distance de plus de 30 m

¹⁰⁹ Ministères de l'Administration des Atolls et de l'Environnement

(100 pieds) des habitations, alors que, sur l'île d'Hithaadhoo, dans l'atoll d'Addu, la distance limite de prélèvement est à 91,5 m du rivage.

Tableau 26 : Suivi des extractions dans l'île de Baarah, atoll de Haa Alif

	1996 ¹¹⁰	1997	1998	1999	2000	Total	Moyenne
Sable (sacs)	5 817	9 029	4 785	3 690	2 131	25 451	5090
Sable (m³)	206	319	169	131	75	900	180
Fragments (m³)	34	127	28	31	54	274	55
Corail (m³)	58	122	42	1	13	236	47

d'après (Macalister Elliott Et Partners Ltd., 2001)

D'après les données collectées, on observe un recul sensible des prélèvements des blocs coralliens ou du sable et une augmentation de ceux des fragments coralliens. Cette baisse peut être attribuée à une volonté locale de réduire les prélèvements insulaires et/ou à la diminution du nombre de mineurs pratiquant l'activité.

La demande en agrégats des îles-hôtels comme des îles locales est importante. Ainsi, lors de notre dernier séjour, nous avons pu relever quelques demandes pour l'année 2002, confirmant encore que tous les types d'agrégats pouvaient être utilisés comme par exemple pour l'île-hôtel de Medhufushi dans l'atoll de Meemu (rechargement de plage estimé à 32 521 m³) ou celle de Ranveli dans l'atoll d'Alif (extraction de 12 675 m³ de sédiments dans le lagon, et exploitation d'un faru par des mineurs locaux). D'après une étude (U.N.D.P., 2000) menée sur douze *resorts* de l'archipel, aucun ne s'est imposé des règles quant à l'instauration d'une limite dans l'extraction du corail. Seule, la pratique de l'extraction est autorisée lorsqu'il s'agit de la construction des brise-lames. (U.N.D.P., 2000).

Aux Tuvalu, l'interdiction de prélever et d'exploiter du corail à des fins privées a été instituée officieusement il y a une trentaine d'années. Depuis, c'est le bureau du *Funafuti town council* qui gère l'exploitation et contrôle les prélèvements communautaires en appliquant la loi de 1978 relative aux remblais et à l'exploitation des fonds marins (Government of Tuvalu, 1978a). Dans l'article trois, paragraphe deux, il est stipulé que « no person shall remove from the foreshore of any part of Tuvalu any sand, gravel, reef, mud, coral or other like substance without having first obtained from the island council in whose area of authority such foreshore lies a licence for that purpose ». Toute personne allant à l'encontre de cette loi est passible d'une amende de 250 \$ A, soit environ 145 €

Pour remédier à cette interdiction, il existe deux importateurs officiels de matériaux dans l'atoll de Funafuti, le Japon et les Fidji. Le gouvernement souhaiterait par leur intermédiaire contrôler à l'avenir l'ensemble du marché. Pour cela, les Japonais et/ou les Fidjiens importeraient de grandes quantités de

¹¹⁰ De juillet à décembre 1996

matériaux à prix réduits qui seraient ensuite revendus par le gouvernement lui-même auprès des personnes privées. Le projet est ambitieux et limiterait l'impact sur l'environnement, mais, là encore, il faut effectuer en amont un travail d'explication auprès de la population. En effet, pourquoi irait-elle acheter plus cher un produit qu'elle trouve sur ses côtes et qu'elle considère comme de meilleure qualité ?

Les espaces communautaires de prélèvement du côté lagunaire, après autorisation du *Funafuti Town Council*, qui se situent grossièrement entre la piste d'atterrissage et le sud de l'île de Fongafale, abritent les éléments les plus fins comme le sable ou les petits galets. Du fait d'une raréfaction de la fraction sableuse, les prélèvements se composent donc exclusivement de petits galets. Si l'on choisit, par contre, d'extraire les éléments de la façade océanique, ce sont les gros galets coralliens qui seront privilégiés.

Afin de limiter le prélèvement prévisionnel ou esthétique, chaque extraction, quelle que soit la fraction prélevée, est désormais payante au prorata de sa quantité.

Voici donc la théorie mais qu'en est-il vraiment sur le terrain ?

Lors de nos séjours dans l'archipel, nous avons pu assister à un ballet ininterrompu de personnes privées ou issues des ministères en train de récolter des galets dans la partie la plus méridionale de l'île de Fongafale. Certains embarquent tout dans des camions, d'autres sont à motos et mêmes des enfants chargent des sacs qu'ils laissent sur place pour les adultes.

Il n'est pas rare de voir aux abords des maisons des tas de galets disposés là pour un aménagement futur, ou encore des murs ou des terrasses de galets exclusivement décoratives. Là encore, le contrôle n'existant pas, la loi n'est pas respectée.

Si les prélèvements n'ont pas stoppé, leurs quantités ont diminué, si bien que la cimenterie établie à Fongafale a fermé ses portes vers 1998¹¹¹. C'est elle qui a édifié les blocs localisés sur la façade lagunaire de la partie centrale de Fongafale.

Ces îles sont faites de paradoxes puisque les matériaux qui ont servi à construire les blocs de protection ont été prélevés *in situ* sur les plages lagonaires alors émergées !

Si l'on s'accorde donc à traquer l'exploitation sauvage des récifs, par le biais de lois et de réglementations, en pratique rien n'est fait pour les faire appliquer. Que ce soit aux Tuvalu, aux Maldives, aux Kiribati ou en Polynésie française, où la pratique est interdite ou strictement réglementée d'après les textes en vigueur, on s'aperçoit que les habitudes sur le terrain n'ont pas changé (Salvat B., 2000).

¹¹¹ Responsable des extractions – *Funafuti Town Council*

8.3. Les conséquences des extractions sur l'évolution du milieu

D'après un rapport établi pour le GCRMN (*in* Rajasuriya A. *et al.*, 2000), il était indiqué que « la construction de quais, d'épis ou de brise-lames est le résultat d'une érosion croissante des côtes autour des îles touristiques maldiviennes ».

Une étude semble avoir montré que, sur « l'atoll de Malé, l'extraction du corail, évaluée à 500 000 m³ par an, abaissait le niveau de la plature corallienne d'environ 15 mm, soit de 8 à 10 fois la valeur annuelle de l'élévation actuelle du niveau de la mer » (Paskoff, 2001). Des travaux menés dans d'autres archipels, comme aux Philippines, ont montré que le recouvrement de la moitié des espaces coralliens endommagés par dynamitage pouvait prendre plus de quarante ans (Dahl A.L. et Salvat B., 1988) avant qu'ils soient recolonisés.

Les récifs coralliens de l'archipel des Maldives connaissent une surexploitation désastreuse dont les causes sont à rechercher dans le développement économique de l'Etat. En effet, la mécanisation des bateaux de pêche (Munch-Petersen N.F., 1985), l'amélioration des moyens de communication, l'augmentation du niveau de vie des populations et le développement de certains secteurs économiques ont eu pour conséquence une surexploitation des milieux naturels.

En 1985, les dommages sont déjà largement perceptibles : « coral mining and souvenir collecting are the major causes of coral reef degradation in the Maldives » (Commission ESCAP, 1985 *in* Soffe S., 1991). Afin de mesurer véritablement l'impact de ces pratiques sur les colonies coralliennes qui servent d'ossature aux morphologies récifales, des surveillances ont été entreprises par des chercheurs étrangers (Brown B.E. et Dunne R. P., 1988). Ainsi, à Mathi faru¹¹² situé dans l'atoll d'Haa Alif, qui a servi pendant longtemps de zone d'approvisionnement pour l'île de Dhidhdhoo (Haa Alif), après un arrêt total des prélèvements, l'espace est resté totalement dénudé, sans aucune vie corallienne, pendant plus de 3,5 ans. Il s'avère que depuis cette étude, ce récif est de nouveau exploité.

Pour un site qui n'a subi aucun dommage, la couverture de corail vivant se situe entre 11 et 60 %. Pour un site exploité durant plus de dix ans, et pour certains jusqu'à 16 ans, la couverture corallienne ne représente pas plus de 0,5 % de la couverture totale. Il s'agit, par exemple, du site de Kuda Bandos, dans l'atoll de Malé nord. Pour un site exploité durant cinq ans, comme, par exemple, le récif de Vilingili, dans l'atoll de Malé nord, la couverture corallienne vivante représente environ 1 %. Les sites densément exploités il y a seize ans et abandonnés depuis par les mineurs retrouvent tout juste un début de recolonisation. Les auteurs estiment que certains sites mettront plus de cinquante ans avant d'être recolonisés et que la mort est assurée pour ceux qui ont été extrêmement endommagés.

¹¹² Faru de 1,2 km²

Bien que « la surface corallienne endommagée par les activités humaines soit relativement petite comparée à la surface corallienne totale de l'archipel » (Rajasuriya A. *et al.*, 2000), les conséquences de son exploitation peuvent être ressenties sur un espace plus vaste que le seul espace exploité.

Les extractions coralliennes ont une incidence directe sur la biodiversité de l'écosystème récifal. C'est ainsi qu'une réduction importante des poissons récifaux a une implication directe sur le secteur économique de la pêche qui est la seconde source de devises de l'Etat. En effet, l'appauvrissement de l'écosystème va avoir un impact direct sur la quantité d'alevins de récif qui servent de proies pour les pêcheurs pratiquant la pêche aux thons. Etant pauvre en poissons, la chaîne alimentaire animale, marine comme terrestre, est perturbée, et le héron en particulier *Butoroides stiatius didii*, qui est une espèce endémique à l'archipel, risque de disparaître si les extractions se multiplient. Ceci a été également observé dans l'archipel de Riau en Indonésie (N.E.S., 2003) où les prélèvements qui ont endommagé des récifs et des îles coralliennes ont eu des conséquences directes sur l'économie locale avec la disparition des pêcheurs du fait d'une raréfaction des espèces. L'appauvrissement des espèces coralliennes peut être due également à des causes indirectes et quelquefois lointaines comme, par exemple, les fines particules issues de l'extraction qui se déplacent au gré des courants et se déposent sur des sites sains causant ainsi des dommages irréparables.

Il est rare de trouver à l'heure actuelle des rapports qui envisagent que les extractions puissent être la cause de l'érosion côtière ou des différents dommages que subissent les littoraux, comme cela a été observé aux Maldives. Pourtant, de nombreux littoraux situés en arrière de récifs coralliens sont affectés par une érosion côtière née des prélèvements d'agrégats marins. L'Indonésie a vu ainsi disparaître sept îles du détroit de Macassar dans la province de Kalimantan Est, et cela « n'est pas là l'effet d'une montée des eaux, mais celui de l'extraction intensive de sable » (N.E.S., 2003). Le Professeur I.A. Maryono¹¹³ poursuit : « dans les dix à vingt années à venir, l'Indonésie va perdre des centaines, voire des milliers d'îles, à cause de l'exploitation du sable marin et des courants marins qui font et défont les îles ». Une étude menée à grande échelle par imagerie satellitaire a permis de montrer que les littoraux de Djakarta et de Ujung Pandary étaient également victimes d'une sévère érosion liée à l'impact direct des vagues depuis le récif, du fait d'une extraction complète des platiers coralliens (Mallik T.K., 1999). Le cas de l'Indonésie diffère sensiblement de celui de nos archipels car, si aux Maldives ou aux Tuvalu, l'extraction de sable se pratique de façon « vivrière », en Indonésie elle est destinée majoritairement à la vente.

La faute n'incombe pas uniquement aux mineurs mais également aux aménageurs des îles. Dans de nombreuses îles-hôtels, les platiers ont été entièrement déroctés afin d'apporter des matériaux pour la construction des bungalows comme, par exemple, dans l'île de Rihiveli, dans l'atoll de Malé sud (Rufin C., 2002). Comme le soulignaient très justement *The Netherlands Ministry of Economic Affairs*

¹¹³ Université Gadjra Mada à Jogjakarta

et l'UNEP (1989), plus le corail est prélevé pour faire face à la demande croissante de population, qui souhaite en plus protéger ses nouvelles installations, plus l'érosion des côtes est rapide et importante.

Les membres des différents ministères que nous avons pu rencontrer sont unanimes quant à la première cause de dégradations des îles, l'élévation du niveau de la mer. Même les auteurs des rapports des années 1990 (Ministry of Planning and Environment, 1991 *in* Soffe S., 1991) qui envisageaient une relation de cause à effet entre extraction de matériaux coralliens et érosion des côtes considèrent que cela n'est plus vrai aujourd'hui. Si l'élévation du niveau de la mer est effective, les extractions vont jouer un rôle indéniable dans les perturbations aval du système littoral. En effet, le déroctage de platier pratiqué sur certaines îles habitées, le prélèvement de sable sur les plages ou l'extraction de blocs de corail sur le récif entourant l'île sont autant de causes d'une accentuation des risques pour les habitants.

Il est malheureusement plus simple d'accuser la nature que de s'accuser soit même des perturbations que peuvent connaître les littoraux. Comme le soulignait un rapport : "the Maldives are undermining their safety with considerable speed" (Ministry of Economic Affairs et Unep, 1989). Des rapports locaux (Ali M., 1991) considèrent cependant l'impact des extractions de sable ou de corail comme minime.

Ne souhaitant plus exploiter leurs îles de façon intensive, les mineurs migrent d'un faru à un autre ou d'une île inhabitée à une autre île inhabitée.

Aux Tuvalu, seule la construction de la route est apparue comme néfaste pour l'environnement aux yeux des Tuvaluans. Elle a été, avant même son achèvement, la cause d'érosion sur la façade lagonaire par l'arrachage systématique des cocotiers et autre végétation. Comme l'indiquaient B. Aalbersberg et J. Hay (1991), « les routes ou les autres structures sont extrêmement vulnérables pour les îles basses et étroites que sont les motu ». Par contre, la population n'a pas été sensibilisée par l'impact des prélèvements ou des dynamitages de platiers qui ont été réalisés sur leurs côtes durant la Seconde Guerre mondiale et qui ont modifié le transit sédimentaire et annihilé tout transport de sable à la côte. D'après les discussions que nous avons pu avoir avec des Tuvaluans, le sable, pourtant important avant les travaux, a totalement disparu des côtes en moins de trois ans. Seul un placage timide semble se développer dans la partie lagonaire centrale de Fongafale.

L'extraction, dans le cas de micro-Etats insulaires en développement, se pratique à proximité du rivage car les prélèvements lagonaire profonds impliquent des coûts d'extractions que le gouvernement tuvaluan ne peut assumer seul. Quels que soient les lieux où se pratique l'extraction, les conséquences sur le littoral, à des échelles de temps variées, sont désastreuses. Pourtant, le recul lié aux extractions de plage semble systématique dans le cas des Tuvalu, des Kiribati, des Tonga (Tappin, 1993 *in* Gillie R.D., 1997) et des Maldives.

Nous aborderons les mesures de protection dans le chapitre suivant. Il permet de reconsidérer l'ensemble des impacts et de tenter d'apporter quelques solutions afin de réduire la pression anthropique sur le milieu, notamment dans la perspective d'une recrudescence des forçages naturels.

S'il est, comme nous venons de le voir, extrêmement difficile de quantifier véritablement l'impact des pratiques d'extractions sur le comportement morphologique des îles et des archipels, nous pensons toutefois que ces actions répétées jouent un rôle indéniable dans l'érosion des côtes autant que la menace représentée par la remontée du niveau de la mer.

Chapitre 9 - Vers une gestion plus adaptée des espaces insulaires

En surimposition des événements naturels, les récifs coralliens subissent une dégradation liée aux impacts anthropiques comme l'augmentation de la population, l'exploitation incontrôlée des écosystèmes... (cf. Figures 202 et 200, 201, 203 - annexe). S'il est difficile pour des espaces insulaires exigus « d'isoler les faits humains des processus naturels » (Brigand L., 2000), ils peuvent être toutefois mieux gérés afin de limiter leurs impacts.

En effet, sans pour autant être la solution compensatoire à l'ensemble des problèmes des îles atolliennes, une meilleure gestion des territoires peut assurer leur préservation et rendre la vie plus agréable aux insulaires, dans un engagement sur le long terme. Au travers de ces réflexions, nous souhaitons limiter l'impact sur les milieux. Certaines solutions envisagées visent à préserver la santé des coraux, d'autres sont destinées à limiter la pression anthropique sur les milieux au travers de politiques globales ou locales.

Ces solutions nécessitent un investissement local important aussi bien par le gouvernement que par la population. Ne disposant pas d'un modèle propre, nous nous sommes inspirée des modèles européens ou internationaux qui ont été réfléchis puis mis en place depuis plus de vingt ans. S'ils nous servent de référents, ils devront toutefois s'adapter aux milieux et à la culture insulaire et prendre en compte leurs caractéristiques fondamentales. Si nous envisageons la gestion de nos espaces littoraux dans un concept environnementaliste, écologique, économique ou naturaliste, il conviendra de garder à l'esprit que dans leur cas, il s'agit d'une véritable question de survie.

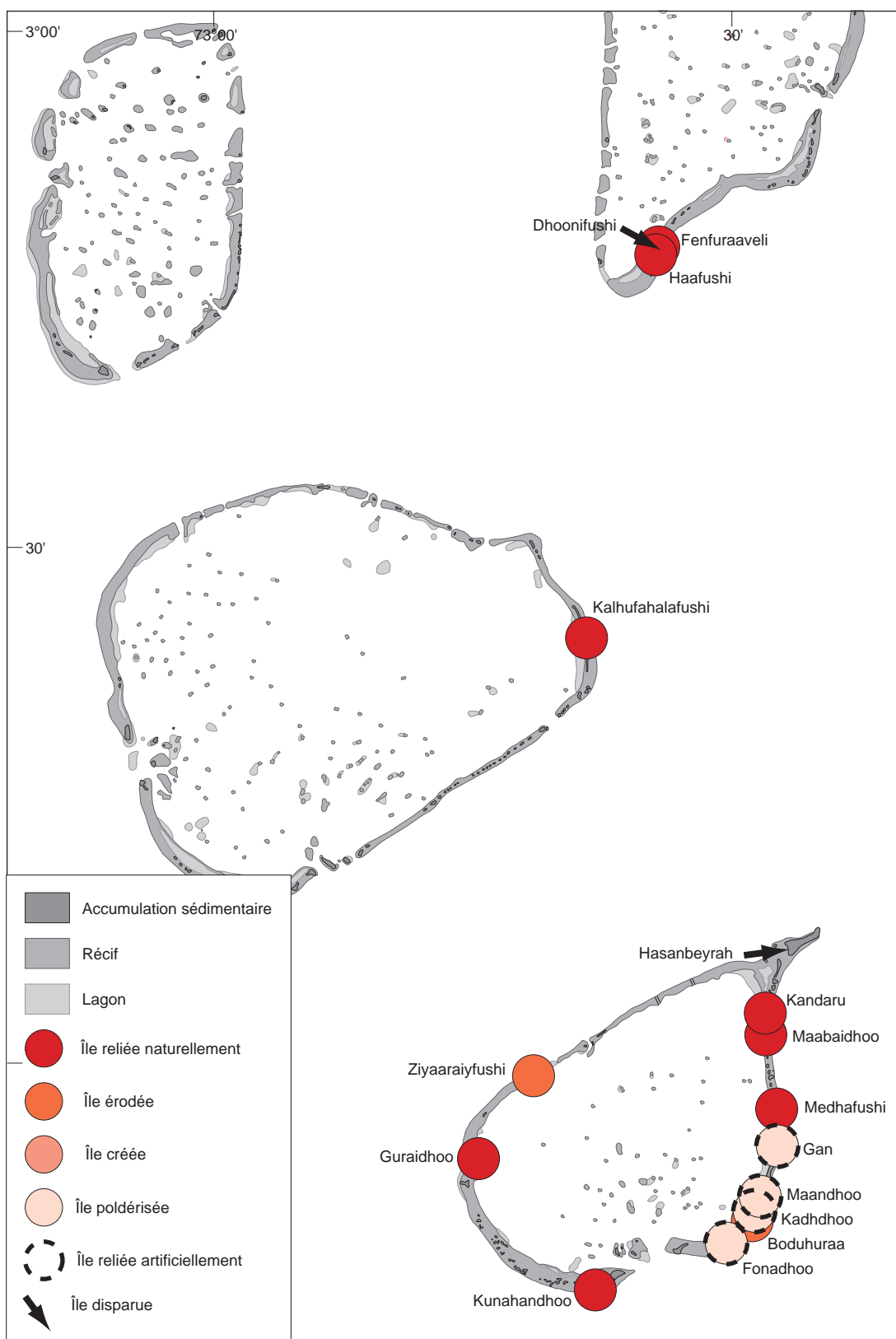
Nous n'allons toutefois pas détailler un système complet pour une gestion globale des territoires dans une perspective écologico-économique à l'échelle de l'archipel, mais plutôt nous inspirer de ce qui se pratique couramment aux Tuvalu ou aux Maldives, en envisageant des modifications qui leur sont peut-être plus adaptées.

Il est primordial de réduire la vulnérabilité des sites en prenant des mesures adaptées à ces systèmes et en anticipant les impacts. C'est dans ce but que le concept « *integrated coastal management* » a vu le jour en 1992 lors de la conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement.

9.1. Réflexions sur le thème de l'assainissement

Parler du problème de l'assainissement pour les îles basses coralliennes nécessite une réflexion plus globale notamment sur la gestion des eaux des lentilles d'eau douce, des pollutions aquifère et pédologique. Les deux archipels abordent ce problème de façons différentes qui, à nos yeux d'occidentale, ne règle rien. Lorsque nous évoquons le terme d'assainissement, nous envisageons à la fois le traitement des eaux usées mais également le traitement des effluents humains.

Figure 202 : Recensement des événements naturels et anthropiques ayant affecté l'archipel des Maldives



Pour les îles-hôtels et les îles locales de tailles importantes dans l'archipel des Maldives comme Malé, (bien que dans son cas un traitement préalable soit effectué), Gan, Vilingili, l'assainissement peut se pratiquer de différentes façons par une évacuation vers le lagon ou vers le large, au-delà de la barrière récifale par le biais de tuyau en PVC, par la mise en place d'une fosse septique fermée dans le sol corallien. Dans les îles locales maldiviennes, les eaux usées sont jetées à même le sol alors que les effluents humains sont soit disposés dans une fosse fermée soit dans un trou ouvert. Ainsi, sur ces îles se côtoie l'*akiri*¹¹⁴, le puits assurant l'alimentation en eau courante de la famille pour la toilette, et la citerne creusée à même le sol qui permet de collecter les eaux de pluie pour la consommation courante.

Dans les îles tuvaluanes, la technique est quasi similaire. Rares sont les habitations qui disposent de toilettes dans l'île de Fongafale. Seules les *guest houses*, l'hôtel, les administrations et les maisons construites récemment offrent des toilettes et des douches se déversant dans une fosse à même le sol. Dans la pratique, les Tuvaluans se lavent dehors avec l'eau prélevée dans les puits, et font leurs besoins sur les côtes lagunaires et/ou océaniques. Comme pour les îles maldiviennes, les fosses creusées dans la structure de l'atoll avoisinent les puits de la lentille d'eau douce mais ne sont toutefois pas en contact avec les citernes qui assurent les besoins quotidiens en eau potable.

Ces échanges constants entre les eaux de la lentille d'eau douce et les effluents humains provoquent des pollutions importantes ayant des répercussions sur la santé publique car une pollution continue de la nappe d'eau souterraine peut provoquer une concentration en éléments pathogènes dangereux pour la santé. La constitution du sol et du sous-sol, qui sont extrêmement poreux et perméables, constitue un facteur aggravant. L'infiltration et l'écoulement des eaux polluées en direction du lagon peuvent provoquer une réaction sur la chaîne alimentaire. Ainsi polluées, les eaux lagunaires vont contaminer les poissons et les coquillages qui y vivent et qui sont à leur tour consommés par la population locale qui, ainsi empoisonnée, développe des problèmes gastriques qui vont se traduire par une réintroduction des éléments pathogènes dans le système. Ceci n'est pas exclusif aux Tuvalu ou aux Maldives car, dans l'atoll de Tarawa, ce problème sanitaire a pris des proportions encore plus importantes.

Comme l'écrit B. Salvat (2000), « none of the islands, except Bora Bora have major sewage treatment facilities and most wastes are flushed directly into reef lagoons. (...) This practice is a major problem on the urbanised islands where high densities result in human faecal contamination as well as pollution from pig breeding areas in coastal margins ».

A l'échelle des îles locales pour l'archipel des Maldives ou pour l'ensemble des structures insulaires dans l'archipel des Tuvalu ainsi que sur l'île capitale, la mise en place d'un système d'assainissement ne peut être envisagée car la capacité d'assimilation du sol est trop réduite et sa qualité est défavorable

¹¹⁴ Toilettes

à l'assainissement individuel. Pour ces territoires insulaires, nous avons envisagé l'introduction de toilettes sèches qui ont le double avantage de ne pas nécessiter d'eau et d'apporter de la matière organique pour des sols qui en manquent cruellement.

Cette technique consiste à disposer un bac au débouché des lieux d'aisance afin de collecter les matières fécales auxquelles sont ajoutées des matières carbonées en vue d'un compostage. Il peut s'agir de sciure de bois, qui a l'inconvénient d'imposer la mise en place d'une filière d'importation afin de ne pas fragiliser les systèmes insulaires par une déforestation, ou de coques de noix de coco inutilisées après l'exploitation du copra et broyées. Peuvent être ajoutés à ce mélange des papiers, qui sont à l'heure actuelle jetés dans le *borrow pit* de Tengako, même si certaines encres contiennent du plomb et divers métaux lourds. Il suffirait d'éliminer les papiers spéciaux de cette filière afin de limiter les pollutions. Cette méthode n'implique pas de problèmes bactériens car le compostage induit une chaleur suffisante pour la destruction des bactéries. Le compost issu de cette détérioration pourrait être assimilé aux déchets verts de chaque famille, puisqu'il est de tradition de récupérer au petit matin l'ensemble des feuilles disposées sur chaque parcelle, pour les jardins individuels ou collectifs.

La mise en place d'un tel projet auprès de la population ne nous paraît pas contraignante, étant donné que chaque matin plusieurs familles vont jeter les effluents de la nuit dans le lagon ou dans l'océan.

La mise en place d'une station de traitement est utopique, étant donné l'exiguïté de l'île, le manque de déclivité du terrain, les moyens financiers et le besoin énergétique nécessaire pour le fonctionnement des pompes.

Si nous avons envisagé cette phase de recyclage pour l'île de Fongafale, ceci semble être tout à fait applicable pour les îles locales des Maldives dans le sens où il s'agit d'îles peu développées, utilisant un système assez archaïque.

La pollution de la lentille d'eau douce est inéluctable dès que la population dépasse le seuil d'assimilation. Ceci peut devenir un problème majeur pour l'avenir des populations dans une évolution régressive des précipitations. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la baisse des précipitations induit une réduction de la lentille d'eau douce qui peut avoir des conséquences sur la remontée de l'eau salée et provoquer une salinisation des sols. Afin de pallier ce manque de ressource, certaines îles comme les îles touristiques dans l'archipel des Maldives, les îles-capitales ou d'autres îles suffisamment importantes, se sont dotées de désalinisateurs afin d'aller à l'encontre des phénomènes naturels ou anthropiques. Cette pratique au-delà de l'aspect financier demande des besoins énergétiques importants, un approvisionnement quotidien en fuel, ce qui n'est pas le lot de toutes les îles, et un service de maintenance adapté. C'est dans cette perspective que certains auteurs (Van Putten F., 1988) ont envisagé le rechargement des lentilles d'eau douce pour les îles locales à partir de bateaux citernes. Elles seraient rechargées en plusieurs étapes afin de faciliter l'assimilation des apports. L'auteur évoque toutefois des conditions impératives comme une épaisseur initiale

suffisamment importante et une absence ou une limitation dans la pollution de la lentille, ce qui exclut de fait l'île de Fongafale.

9.2. Repenser la gestion des déchets

Les ouvrages que nous avons pu consulter concernant le problème des déchets pour les espaces insulaires surpeuplés montrent qu'aucune mesure n'a été préconisée dans les nombreux rapports nationaux, internationaux ou de sociétés privées engagées dans la gestion des îles. Tout le monde est focalisé sur le problème de l'érosion côtière, qui reste majeur mais qui n'est pas le seul dans une vision de préservation des systèmes insulaires.

Pour des micro-Etats insulaires, le devenir des déchets est un réel problème. Si les Maldives ont souhaité utiliser leurs déchets dans la construction d'une île artificielle, avec tout ce que cela entraîne en terme d'environnement, les Tuvaluans s'interrogent sur les méthodes à employer.

La mise en place d'une déchetterie ne peut être envisagée du fait de l'exiguïté des îles et de la surpopulation dont est victime Fongafale. Il faut alors envisager une gestion insulaire avec le développement d'une filière annexe par l'exportation de produits ou l'implantation d'une usine de traitement dans une île proche de la capitale, bien que cela soit totalement utopique étant donné les coûts engagés pour la construction de l'édifice, son fonctionnement et le service de maintenance.

L'accroissement de la population et l'apport significatif des influences occidentales dans le mode de vie tuvaluane induisent une modification profonde des habitudes de vie. Le rapport à l'alimentation et à la consommation, les importations de produits nouveaux souvent issus d'une technologie moderne posent la question de leur place au sein d'une chaîne de consommation et d'élimination inadaptée.

Pour réaliser cette étude de cas sur l'île de Fongafale, nous avons souhaité connaître la nature des déchets produits et le système d'élimination mis en place. Implicitement nous nous sommes interrogée sur les résultats de cette méthode, ses incidences et ses effets sur une population qui dispose d'un rapport à la nature et à l'environnement en décalage avec les principes occidentaux. Enfin, nous avons envisagé des solutions pour traiter l'urgence de la gestion des déchets sur l'île et ses incidences sur de nombreux domaines connexes.

9.2.1. Analyse de la production et du système en place

9.2.1.1. La production

La production tuvaluane n'est pas comparable à celle d'une nation occidentale développée, compte tenu des ressources financières des familles, mais aussi des difficultés d'acheminement des produits.

On comptabilise environ 260 kg de déchets par an et par habitants, ce qui peut paraître relativement modeste par rapport en France qui en comptabilise 360 kg/an/hab en 2002.

L'interrogation se porte sur la capacité des Tuvaluans à recycler convenablement cette production en assurant un traitement de qualité qui ne mette pas en péril la santé de la population locale.

Nous avons fait apparaître quatre grands types de déchets (cf. Figure 204). (1) Les déchets ménagers spéciaux se traitent spécifiquement, or les Tuvalu ne disposent pas des structures adéquates. (2) Les déchets organiques recyclables peuvent aisément faire l'objet d'une séparation et d'une valorisation sur site. (3) Les déchets de verre et de métal qui peuvent être isolés et orientés vers des filières à valoriser et, enfin, (4) les déchets qui ne peuvent se recycler.

Les déchets de type bois, gravats et fermentescibles n'apparaissent pas dans ce classement car il est de tradition de les réutiliser. Le bois sert de combustible pour les feux des foyers, les gravats sont utilisés pour la construction ou sont abandonnés dans un dépôt sauvage. Les fermentescibles sont quant à eux redirigés par chaque famille vers les élevages de porcs.

L'analyse d'une poubelle-type nous montre :

- une forte proportion de métaux, 14 %, alors qu'un pays comme la France n'en produit que 4 % dans une poubelle moyenne¹¹⁵,
- de nombreux déchets plastiques (flaconnages, sacs et films) qui représentent 38 % aux Tuvalu contre 11 % en France,
- une faible part du verre représentant 6 % contre 7 % en France,
- du papier/carton faiblement représenté dans l'archipel avec 4 % contre 24 % en France,
- des déchets ménagers spéciaux à hauteur de 2 % contre 0,5 % en France.

Il s'agit bien ici d'une composition spécifique tant sur les proportions que sur la qualité. Les efforts en éco-conception sur les emballages ne semblent pas toucher l'archipel, il n'y a pas non plus de travail sur une réduction à la source, les arrivages de marchandises sont anarchiques et ne répondent pas à une réflexion sur leur élimination.

9.2.1.2. Le système de gestion des déchets

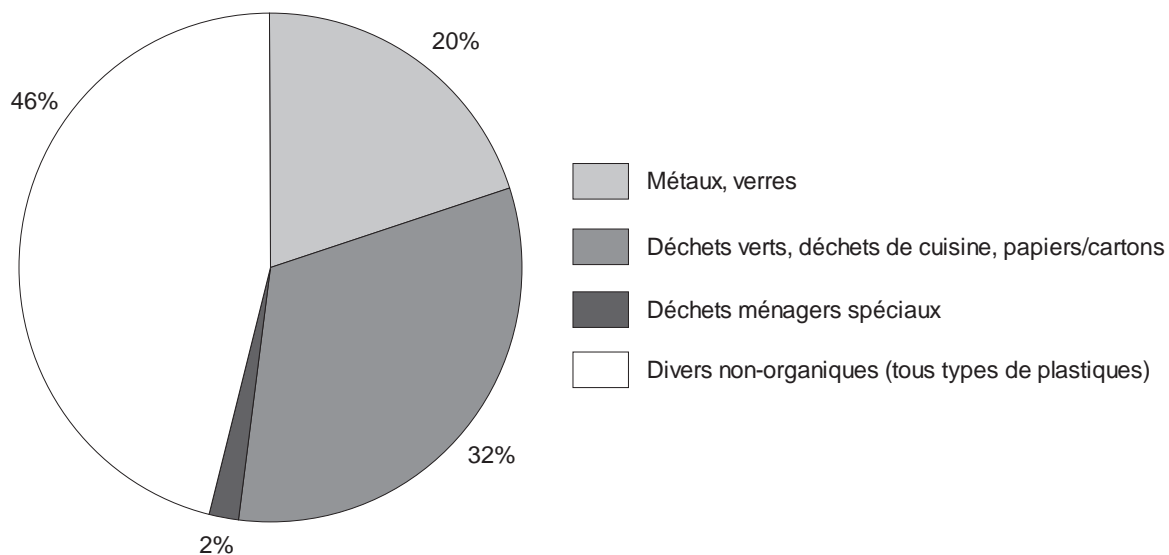
La société tuvaluane a évolué avec l'augmentation des revenus par famille et les changements dans les modes de vie insulaires importés des îles et des continents voisins par les marins, les voyageurs... Il n'est pas question ici de dresser un portrait pessimiste à travers les perversions d'un mode de vie et ses

¹¹⁵ ADEME (2001), La composition des ordures ménagères en France : données de référence-synthèse.

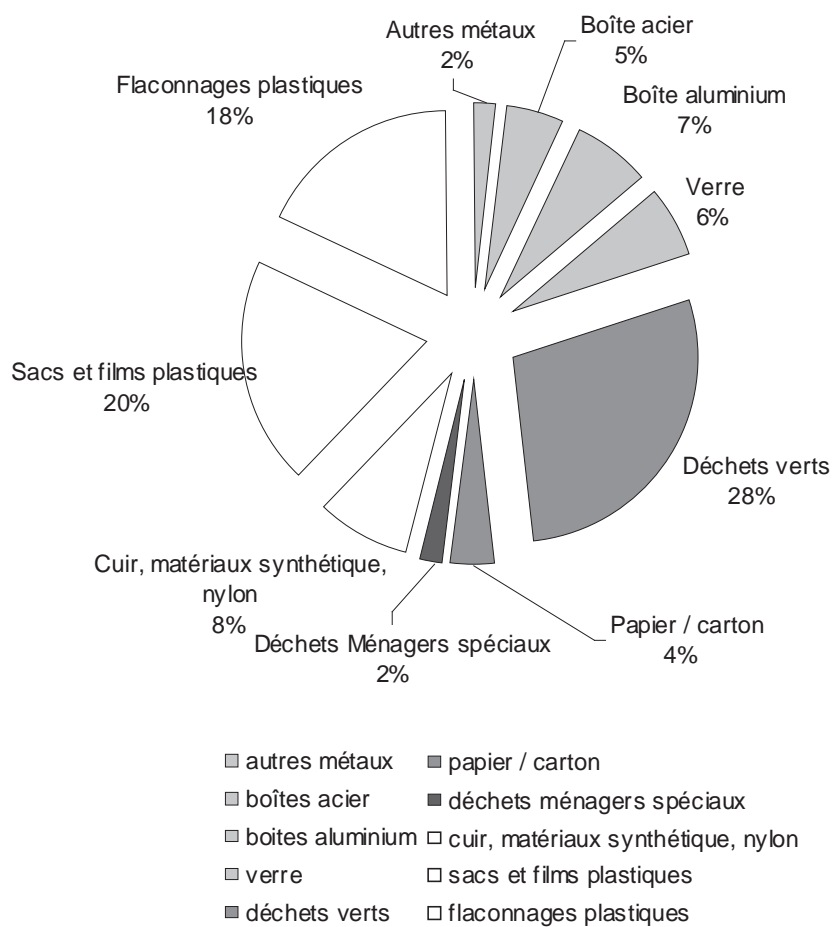
Figure 204 : Production de déchets dans l'île de Fongafale en 2001

A partir d'une détermination, dans les borrow pits, basée sur un prélèvement d'une tonne de déchets

Les grandes familles de déchets dans la poubelle tuvaluane



Détail des types de déchets dans la poubelle tuvaluane



influences sur un autre, mais il s'agit de mettre en évidence la rencontre de cultures et la différence des moyens de traitement.

La situation géographique de l'île et son caractère insulaire exacerbé devraient a priori conduire à une situation préservée, mais, au lieu de cela, le système est contaminé et cela depuis l'arrivée des militaires américains en 1942. Initialement, cette dérive est celle d'une absence de gestion des déchets militaires et la création de véritables bombes à retardement avec les *borrow pits*. Ensuite, le développement progressif des rapports avec les cultures occidentales a introduit des produits nouveaux extrêmement préjudiciables pour le milieu.

Le constat d'une importante production de déchets et de l'absence de gestion a incité le gouvernement à prendre des mesures en association avec le programme international australien « AusAID », qui a investi 1,5 millions \$ A soit environ 875 000 €

Ce programme a pour objectif le traitement des grandes familles de déchets produits sur l'île de Fongafale et la mise en place de solutions de traitement.

Identification des familles de déchets et des filières

Pour considérer la prise en charge d'une famille de déchets, il est important d'en connaître la source (producteur, quantité), le mode de collecte le plus adapté (contenant, véhicule et fréquence de la collecte) et la filière d'élimination et/ou de recyclage envisagée.

Les sources de déchets sont de trois grandes natures, les déchets organiques, les déchets non-organiques et les déchets ménagers spéciaux, auxquels on affecte des filières différentes voire des sous-filières.

9.2.1.3. Limites du système et propositions

Le système en place semble calqué sur celui de nos sociétés, c'est-à-dire basé sur des filières d'élimination et de traitement identifiées et en cohérence avec les moyens financiers des habitants (cf. Figure 205). A ce titre, il existe un décalage entre le programme ambitieux proposé par AusAid et la réalité de l'île.

Plusieurs points font naître une inquiétude sur la pérennité du système et sur l'amélioration des conditions environnementales.

Les points forts du système en place sont :

- le choix du compostage des déchets verts (en forte proportion) et ce en mélange avec des effluents porcins de l'île,

- le choix d'une séparation de la fraction fermentescible des ordures ménagères (déchets verts, petits déchets de cuisine) du reste de la poubelle,
- le choix de la séparation des déchets ménagers spéciaux.

Les points faibles du système en place sont :

- la faiblesse de la filière d'écoulement du compost et l'objectif de revente du produit,
- les stockages dans les *borrow pits* sans aménagement préalable du site au contact de la lentille d'eau douce et de l'eau lagonaire et/ou océanique,
- l'absence de prospective concernant le stockage du déchet ultime (reste de la poubelle après tri des déchets verts, des restes de repas, des déchets ménagers spéciaux). Les *borrow pits* ne sont pas une solution d'avenir,
- la non-prise en charge de plusieurs familles de déchets dont le traitement pourrait être envisagé dans la perspective du comblement de certains *borrow pits*.

9.2.1.4. Des propositions pour une meilleure gestion du problème

Il apparaît comme relativement envisageable d'extraire plusieurs familles de déchets plutôt que les enfouir dans les *borrow pits*.

Il s'agit par exemple de la filière du verre. Si l'on considère le verre comme de la silice en ce sens qu'il est inerte, il n'est pas anormal de chercher à l'isoler et à le broyer avant de l'évacuer en mer. Il peut être rejeté au large par les pêcheurs ou disposé dans une zone de forte énergie afin qu'il se fragmente en de fines particules constituant un nouveau matériau sédimentaire. Cette zone pourrait se situer, par exemple, sur le platier externe dans un déversoir débouchant sur la plate-forme de – 10 m, si celle-ci est bien ensablée. Le bilan de cette étape permettrait un gain de 4 % soit **31,2 tonnes**, pour une production totale de déchets de 780 tonnes.

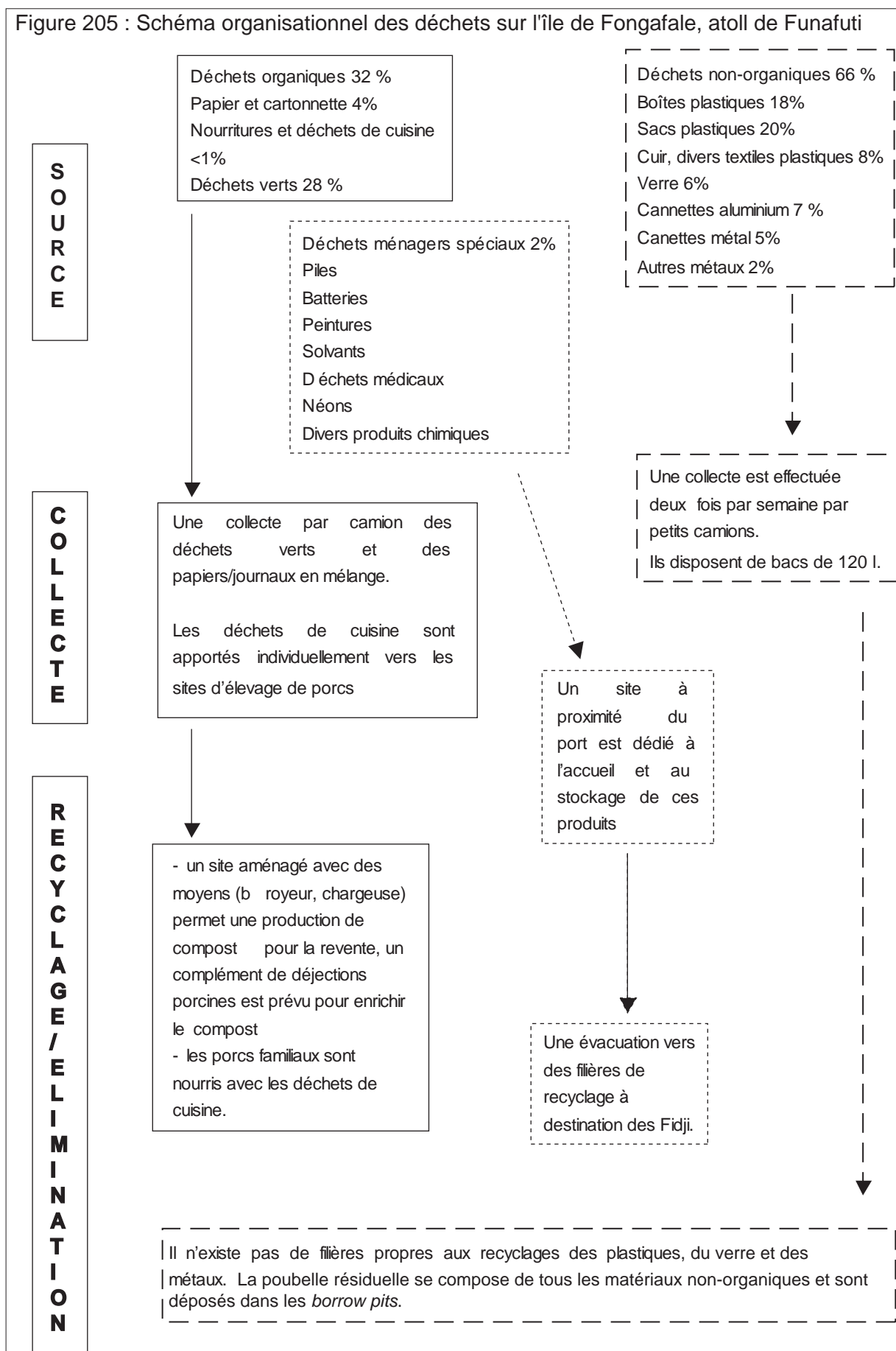
La filière de compostage mise en place pour les déchets verts et le papier carton est acceptable. Cependant, il serait souhaitable d'offrir le compost pour inciter à son utilisation plutôt que de le vendre. L'île ne dispose pas de sols riches et c'est en cela qu'un apport de compost serait des plus profitables, autant individuellement, par une activité de subsistance, que par l'apport végétal que cela peut représenter pour l'île. Il serait judicieux de développer des jardins ouvriers gouvernementaux ou communautaires pouvant alimenter un marché local quasiment inexistant en fruits et légumes.

La clé de l'appropriation de cette pratique nouvelle réside dans l'acceptation par la population du tri des déchets pour les utiliser à des fins personnelles.

Le bilan de cette étape permettrait d'isoler près de 32 % de la poubelle, soit un gain de **249,6 tonnes** pour une production annuelle totale de 780 tonnes.

Les métaux comme l'aluminium et l'acier pourraient être également écartés du déchet ultime tuvaluan par l'instauration d'aires grillagées sur plusieurs points de l'île (5 ou 6 seraient suffisantes),

Figure 205 : Schéma organisationnel des déchets sur l'île de Fongafale, atoll de Funafuti



comme cela se pratique dans l'atoll de Tarawa, afin d'extraire une part importante du tonnage aboutissant dans les *borrow pits*. Ainsi collectée, cette production serait exportée vers les Fidji qui disposent de filières pour fondre et recycler l'acier et l'aluminium. Même si le coût de l'exportation englobe le prix de vente de la matière première, cette opération blanche permettrait d'extraire **93,6 tonnes/an** des 780 tonnes globales.

Des initiatives privées ont été prises notamment avec le propriétaire du Matangigali, le night-club de Fongafale, qui offre aux enfants collectant les emballages métalliques des dollars australiens. Actuellement on estime à 70 %, soit 546 tonnes par an, la part de poubelle qui va s'accumuler dans les *borrow pits*. Compte tenu de la répartition des familles de déchets, il serait intéressant, d'après nos propositions, d'en extraire une part plus importante afin d'accroître la longévité des espaces de stockage. Cette part pourrait atteindre 56 % ce qui laisserait 44 % à l'enfouissement, soit 343,2 tonnes au lieu des 546 tonnes actuelles.

Enfin, d'autres actions plus en amont peuvent réduire la production de déchets ou au moins accroître certaines familles par rapport à d'autres. Les importations pourraient faire l'objet d'un suivi et d'une taxation sur certaines familles de déchets plus polluantes ou plus coûteuses à traiter et à éliminer. Les bouteilles plastiques et les cannettes métalliques pourraient ainsi être remplacées par du verre. Ce dernier apport serait favorable pour le lagon et peu coûteux à l'élimination.

Il reste la question des *borrow pits* comme espaces de stockage du déchet ultime. La porosité mais aussi la présence d'habitations sur ces lieux ne sont pas des facteurs favorables à ce choix. Toutefois, le gouvernement tente depuis plusieurs années de combler ces cavités par des déchets afin d'en faire à terme des surfaces habitables. Cette solution des déchets s'est tout naturellement présentée en substitut de matériaux qui font défaut sur l'île pour combler ces espaces.

Ces mesures initiées par le gouvernement australien doivent être poursuivies par le gouvernement tuvaluan actuel afin de gérer un des problèmes environnementaux majeurs actuels et futurs de l'île. Il semble que dès aujourd'hui une réflexion sur l'incinération adaptée à la production de l'île peut être une réponse. Toutefois, quelle que soit l'option choisie, il reste alors la question du financement des équipements. Seul un programme international peut soutenir de tels projets. Une prise de position aujourd'hui permettra d'anticiper sur une situation inéluctable.

Dans le cas des Maldives, sans modification de leur filière déchet, il peut être envisagé de préférer telle famille à telle autre afin de limiter les pollutions atmosphériques liées par exemple aux combustions des plastiques dans l'incinérateur à ciel ouvert. Comme ce qui a été proposé aux Tuvalu, le plastique et l'aluminium, largement présents dans cette société de consommation, notamment sur l'île capitale et dans les îles-hôtels, pourraient être remplacés par du verre. La présence d'une usine sophistiquée dans les îles satellites de Malé, comme celle de Coca-Cola dans l'île de Thulusdhoo,

permet même d'envisager la mise en place d'une filière de consignes puis d'une filière de broyage pour les bouteilles endommagées. Comme pour les Tuvalu, le verre ainsi broyé pourrait être immergé soit dans des zones à forte énergie soit dans les grands fonds.

A l'échelle des îles locales, les déchets sont soit enterrés, soit incinérés alors que les déchets verts sont réutilisés par les familles dans des jardins individuels disposés autour des maisons comme dans l'atoll de Goidhoo.

La problématique déchet risque de se poser lors de l'implantation des cinq zones de développement envisagée par le gouvernement maldivien. En effet, un regroupement anthropique implique une augmentation du nombre des déchets qu'il va falloir traiter. Certains ont déjà projeté la construction de quatre autres îles-poubelles, d'autres ont prévu la création d'îles satellites dédiées au recyclage des déchets.

9.3. Quelques réflexions sur les extractions de matériaux coralliens

Les extractions de matériaux sablo-coralliens sont extrêmement dommageables pour le milieu insulaire et pour la solidité du récif puisqu'elles entraînent la disparition de la trame basale du récif corallien. Même si l'utilisation de ces matériaux peut être légitimement envisagée pour des pays en développement ne pouvant importer des matériaux de substitution, leur sur-exploitation pose de nombreux problèmes pour la gestion des milieux insulaires et récifaux. Au-delà des limites ou des contrôles qui peuvent être institués dans les années à venir, il est intéressant d'engager quelques réflexions sur la réhabilitation de sites d'extraction qui restent des cicatrices béantes dans le paysage insulaire.

Comme nous l'avons vu précédemment, la destruction des récifs, le déroctage des platiers, les extractions massives sont autant de causes de la vulnérabilité des édifices, déjà mis à mal par les impacts naturels. Des solutions peuvent être avancées, soit en instaurant des limites à l'extraction, soit en l'interdisant, soit en favorisant la réhabilitation de certains sites endommagés.

Lorsque des platiers ont été entièrement détruits pour fournir les matériaux nécessaires à la construction, la méthode de la transplantation corallienne sur des récifs coralliens artificiels peut être une des solutions à envisager. Une expérimentation a été menée sur le faru de Galhu Falhu dans l'atoll de Malé Nord, à seulement 2,4 km de la capitale. Durant vingt ans, ce faru a été exploité pour les besoins de Malé. Extrêmement endommagé, il a fait l'objet d'une expérimentation par la mise en place sur le platier corallien détruit de récifs artificiels. D'après les premiers résultats (Clark S. et Edwards A. J., 1994 ; Clark S. et Edwards A.J., 1995 ; Clark S. *et al.*, 1999), après 6,5 mois de présence, les espèces coralliennes pionnières ont commencé à s'implanter (*Pocillopora damicornis*). Dix mois après le début de l'expérimentation, des coraux branchus ainsi que des espèces massives se sont développés. Après 3,5 ans (Clark S. et Edwards A. J., 1999), chaque récif artificiel abrite plus de 500 colonies

coralliennes dont certaines sont déjà bien développées, atteignant jusqu'à 30 cm de diamètre. Pour chaque bloc, le peuplement se distribue ainsi : 50 % d'*Acropora*, 45 % de *Pocillopora* et 5 % de coraux massifs de type *Porites*. Pourtant efficace, cette technique est longue et son coût limite sa généralisation. Elle ne peut s'appliquer qu'à un nombre limité de sites sur un archipel et pour des micro-Etats disposant d'une certaine aisance financière.

Certains anciens sites d'extraction localisés dans l'île de Fongafale ont été imaginés comme sites de reconversion. Il s'agit de transformer certains *borrow pits* en parcs à poissons ou à tortues, comme cela est actuellement pratiqué par la population locale dans celui du nord de l'île de Fongafale qui est toujours en eau. U.L. Kaly (1999) avait imaginé de mettre une bâche plastique enveloppant les *borrow pits* afin de les rendre aptes à l'exploitation. Si l'idée est originale, le problème de l'étanchéité du site se pose notamment durant les cycles de marée de vives eaux au cours desquels ils se remplissent et se vident. Ne pourrait-on pas envisager la mise en place de nurseries de poissons tropicaux, destinés à l'exportation vers les pays asiatiques ou vers l'état d'Hawaï au sein du lagon de Funafuti ou de Nukulaelae, afin de réduire la pression anthropique ? L'atoll de Christmas, dans l'archipel des Kiribati, a mis en place un commerce similaire d'exportation pour les collectionneurs étrangers. Ce commerce permettrait de créer des emplois locaux en assurant un revenu supplémentaire pour l'Etat. Ainsi, l'archipel des Tuvalu pourrait devenir célèbre non seulement pour ses timbres mais également pour ses poissons.

Dans le cas des travaux impliquant le déroctage des platiers coralliens ou le dynamitage du récif, au-delà de l'aspect purement destructeur de cette pratique, les matières en suspension peuvent avoir un impact important sur les colonies saines situées autour de la zone d'extraction. Pour éviter cela, certains ont envisagé (Holthus P., 1990) la mise en place de filets à mailles extrêmement fines afin d'éviter le dépôt de particules sur les récifs qu'elles asphyxient et tuent.

Il faut peut-être préférer le pompage profond dans le lagon pour éviter de remuer les particules en suspension en s'abstenant de créer des zones de dragage dans le platier. Le lagon étant un réceptacle sédimentaire naturel, il peut apporter des quantités plus importantes vers la côte lorsque cela est nécessaire.

Le moins préjudiciable pour l'environnement, et certainement le plus utopique, semble être l'importation de matériaux de construction depuis l'étranger. Ceci ne peut être envisagé que par l'instauration de baisses dans les taxes à l'importation, la mise en place d'un trafic maritime entre les Maldives, l'Inde et le Sri-Lanka ou encore entre les Tuvalu et les Fidji sur des produits élaborés issus des carrières. Cet acheminement de matériaux entre l'Inde et les Maldives n'est pas un fait nouveau puisque nous avons pu retrouver sur certaines îles maldiviennes des morceaux de granite rouge servant de lest aux bateaux indiens.

Si notre raison condamne la pratique des prélèvements, du fait des nombreux impacts qu'elle engendre à de multiples échelles spatio-temporelles, elle semble difficilement modifiable pour certains pays en

développement. Il est indéniable que l'extraction des matériaux coralliens, de toutes les fractions granulométriques, a un impact sur les systèmes littoraux amont et aval. Mais quelles solutions peut-on envisager pour modifier ces pratiques ?

Certaines mesures sont uniquement visuelles. Ainsi, les îles-hôtels maldiviennes construites jusqu'au milieu des années 1990, l'ont été avec des blocs de corail collectés sur leurs platiers ou sur leur récif. Lorsque les lobbies environnementaux ont été plus pressants, le ministère du Tourisme a exigé que les édifices touristiques construits à partir de ces éléments coralliens soient recouverts par de la chaux. Il fallait que les Maldives conservent une image positive d'un archipel proche de son environnement. Les seuls héritages encore visibles sont les villages destinés aux personnels des hôtels.

Malgré ce que veulent nous faire croire les gouvernants, l'abandon total de l'exploitation du corail est un leurre. La population tire ses besoins des récifs et/ou des plages et n'est pas prête d'abandonner cette pratique du fait des prix élevés des produits de substitution importés depuis les continents voisins. Si les solutions ne sont pas à rechercher dans une interdiction stricte de prélèvement, elles le sont peut-être dans un meilleur contrôle des extractions ou dans la mise en place de produits de substitution. C'est dans ce sens que la « state building organisation », qui se localise sur l'île de Thilafushi, souhaite modifier l'usage qu'ont les Maldiviens de l'exploitation du corail en motivant l'achat de ciment par l'instauration de prix à la baisse de 50 % par rapport au prix initial.

D'autres mesures ont été préconisées au travers de différents rapports (Mallik T.K., 1999 ; Macalister Elliott Et Partners Ltd., 2001) comme :

- le choix des zones d'extraction qui doit se faire collégialement entre les bureaux d'atolls, les ministères compétents et les bureaux d'étude privée,
- la mise en place d'une profondeur optimale à partir de laquelle le prélèvement sableux devra être déterminée,
- l'enregistrement des quantités prélevées qui devra être effectué auprès des chefs d'îles,
- la surveillance des sites exploités comme des îles inhabitées ou des farus qui sera instaurée suivant une régularité de six mois. Après un an d'exploitation, les mesures seront comparées entre elles afin d'estimer s'il y a érosion ou non des côtes. En cas d'une érosion avérée, les prélèvements seront réduits et pourront être stoppés si elle se poursuit.

Si ces mesures s'avèrent concluantes pour les blocs et les sables coralliens, elles pourraient être étendues, d'après les auteurs, aux fragments coralliens accumulés par les vagues de tempête sur les façades océaniques des îles : leur prélèvement, jamais répertorié, est à l'origine de phénomènes érosifs difficilement quantifiables.

Ces mesures compensatoires ne règlent pas le problème de l'extraction des matériaux coralliens, qui devient une des préoccupations majeures de certaines organisations internationales, qui tentent de le

contrôler. Malgré ce que semblent croire certains auteurs (Cazes-Duvat V., 2001), le sable corallien n'existe pas en quantité illimitée dans l'archipel des Maldives. Certes, il peut être utilisé en remplacement du corail dans la construction des habitations suivant un ratio déterminé, mais son exploitation inconsidérée sera tout aussi dommageable car l'extraction de sable en amont peut être la cause d'une sévère érosion en aval.

Dans cette même perspective, il nous apparaît indispensable de mettre en place un certain nombre de lois et de réglementations, visant à coordonner l'activité et imposer une redistribution des compétences à l'échelle de l'Etat en donnant un réel pouvoir aux chefs d'îles, qui gèrent officieusement la collecte de l'ensemble des matériaux coralliens. Les réponses apportées à nos questionnaires l'ont été par ces hommes et non par les différents ministères de Malé qui ne disposent d'aucun suivi de données et qui se renvoient mutuellement la responsabilité. C'est le Président de la République qui a institué cette hiérarchie afin d'exercer un contrôle quasi total des activités pratiquées sur son territoire. Mais la distance et le souhait des îliens de ne plus être détachés de la capitale réduisent de fait tout contrôle et oblige à envisager d'autres solutions.

Elles consistent à :

- établir une loi réglementant les pratiques d'exploitation, notamment celles concernant l'extraction des blocs coralliens en sanctionnant toute infraction par une amende,
- créer un détachement spécial qui sera en charge de la gestion de l'ensemble des extractions, quel que soit le type d'île, assurant un meilleur contrôle des prélèvements,
- instaurer une taxe plus importante lorsque l'extraction est commerciale et/ou privée (seul le bien communautaire sera épargné). Dans le cas d'un bien commercial, la taxe pourrait être proportionnelle aux profits envisagés tandis que le prélèvement privatif s'effectuerait au prorata des matériaux utilisés et des quantités nécessaires. Ceci permettrait de limiter les extractions privées abusives en responsabilisant les insulaires à leur milieu,
- instaurer une taxe lorsque les mineurs prélèvent sur une île habitée comme, par exemple, l'île d'Hithaadhoo, ou celle de Goidhoo,
- déterminer les zones d'extractions par atoll : elles seront choisies par des experts, d'après un cahier des charges bien déterminé, et seront renouvelées annuellement,
- uniformiser les mesures de prélèvements afin d'assurer une cohérence dans le suivi, entre le ft³, m³, le sac, le dabiya¹¹⁶, le goani¹¹⁷ et le petit goani¹¹⁸,
- réduire la taxe d'importation des matériaux de construction provenant d'Inde ou du Sri Lanka afin de rendre l'offre attractive,
- privilégier l'utilisation du ciment et développer un système d'approvisionnement entre l'île de Thilafushi et le reste de l'archipel,

¹¹⁶ 10x10x6 inches

¹¹⁷ environ 3 ft³

¹¹⁸ environ 1,5 ft³

- instaurer un protocole dans le lavage des sables en cas de prélèvement,
- favoriser la décentralisation en recommandant un contrôle strict des extractions par les chefs d'îles, les *Khateeb*.

Envisager de changer des pratiques ancrées dans les *us* et coutumes insulaires n'est pas chose facile. Pour les populations, les maisons ou les protections côtières édifiées avec des blocs de corail ont une longévité plus importante que celles édifiées à partir de ciment. Comme nous l'avons dit précédemment, les protections côtières ne tiennent même pas un an et sont sans cesse reconstruites à partir de nouveaux matériaux. A Malé, la différence est que, pour les constructions, les sédiments proviennent pour l'essentiel de l'étranger. Il s'agit soit de sédiments fluviaux, soit de sédiments issus du broyage de blocs de granite¹¹⁹.

9.4. Du tourisme de masse au tourisme adapté

« Think globally, act locally »¹²⁰ est le dernier slogan conceptualisé du ministère du Tourisme maldivien. D'après le gouvernement, l'extension de la zone touristique au-delà des frontières actuelles, jusqu'à concerner l'ensemble de l'archipel, est faite pour dynamiser l'emploi local et apporter une rentabilité économique. Le président M.A. Gayoom se targue de montrer que le développement touristique a permis au revenu moyen par habitant de passer de 300 à 2 100 \$ US/an (Randrianarimanana P., 2004), et que l'environnement insulaire est surprotégé¹²¹... Pourtant, les réussites touristiques n'ont été profitables qu'à une minorité de Maldiviens, tous amis ou membres de la famille présidentielle, car, parmi la population, 42 % gagnent moins de 1 \$ US par jour (Randrianarimanana P., 2004). L'implication de cette mesure sur l'environnement corallien et insulaire peut être préjudiciable par la multiplication des prélèvements coralliens, le dynamitage du récif afin de créer des chenaux et des points de baignade... Par cette nouvelle politique de développement supra-touristique, le gouvernement risque de mettre en péril un certain nombre de récifs. Ainsi, les structures touristiques deviennent les générateurs de perturbations pour les milieux insulaires. Irrévocablement, comme le signifient R. Paskoff (1993) et A. Miossec (2001), la dégradation de l'environnement est le corollaire du développement économique.

Si certains (Cazes-Duvat V. et Magnan A., 2004) envisagent pour l'archipel maldivien un développement durable « parce qu'il prend en compte l'ensemble des composantes physiques et sociétales », nous leur répondons que l'organisation gouvernementale actuelle n'est pas prête de tenir compte, notamment dans son développement touristique, de la volonté des hommes. Désormais, les nouveaux projets touristiques ne résultent pas d'un accord bilatéral avec les insulaires, même si des

¹¹⁹ Ministère du Plan - Malé

¹²⁰ <http://www.visitmaldives.com.mv>

¹²¹ Instaurations du jour de l'environnement, le 5 juin de chaque année, et du programme « two million tree ».

tentatives peuvent en donner l'illusion comme, par exemple, dans l'atoll de Baa, mais suivant une décision unilatérale.

Notre immersion au sein de la société maldivienne nous a fait prendre conscience de la perversion du système, d'autant plus lorsque cela concerne le secteur touristique qui est générateur d'un important flux monétaire. Ainsi, l'acceptation ou la modification de permis de construire pour les structures hôtelières doit se faire auprès du ministère de l'Environnement après une étude d'impact (EIA) menée par un bureau indépendant. Il peut être curieux de constater que ce ministère ou tout autre n'a jamais demandé des études secondaires ou refusé certains dossiers du fait de modifications fondamentales du système insulaire. Il s'avère que certains membres de l'administration gérant ces dossiers comme ceux de l'Environnement, du Tourisme, des Travaux publics ou des Pêches et de l'Agriculture sont également les propriétaires des agences privées réalisant les études d'impact.

Pour avoir participé à plusieurs études d'impact dans des structures touristiques, nous avons constaté avec quelle facilité certains fonctionnaires accordaient l'autorisation de construire un port, des brise-lames, des chenaux... Si ce système est profitable au propriétaire d'hôtel qui, en offrant le week end aux membres des ministères et à leur famille, est certain d'obtenir son permis, ou aux représentants des ministères-sociétés privés qui peuvent profiter gratuitement de l'ensemble des prestations hôtelières, ceci est préjudiciable pour l'écosystème.

Rien ne semble malheureusement pouvoir changer cette donne car tout se monnaie aux Maldives.

La multiplication à outrance des ouvrages touristiques à travers l'archipel peut nous interpeller : « est-ce que le tourisme de masse est compatible avec nos territoires insulaires ? » (Bonnet, 1987 in Brigand L., 2000). Sont-ils prêts à accueillir les 650 000 touristes de 2005 ?

Ce questionnement nous renvoie à la notion de capacité de charge qui, désormais liée à la pression touristique d'un espace exigu, s'appliquait initialement à la gestion des parcs nationaux. D'après la définition qu'en donne l'Office Mondial du Tourisme, « le concept de capacité de charge vise à établir en termes mesurables, le nombre de visiteurs et le degré de développement qui sont susceptibles de ne pas avoir de conséquences préjudiciables sur les ressources. C'est la capacité qui peut être atteinte sans dommage physique pour le milieu naturel et pour le milieu artificiel, sans dommage social et économique pour la communauté et la culture locale ou sans nuire au juste équilibre entre le développement et la conservation. [...] Il y a saturation ou dépassement de la capacité de charge lorsque les mouvements de personnes dépassent temporairement le niveau acceptable par l'environnement physique et humain de la zone d'accueil » (G. Cazes, 1992 in Brigand L., 2000). Du point de vue purement comptable, c'est le nombre de visiteurs qui peut se rendre en un même lieu sans qu'il y ait une perte d'attraction du site ou des dommages pour l'environnement. Si ce concept peut s'appliquer aisément à un espace insulaire précis, qu'en est-il à l'échelle d'un archipel comptabilisant 1 098 îles ?

Le ministère du Tourisme se targue encore aujourd'hui d'avoir mis en place un développement économico-écologique des capacités d'accueil en cohérence avec le milieu afin que « le nombre de touristes ne dépasse jamais le seuil limite acceptable pour l'environnement » (Ministry of Tourism, 1979), mais comment cette mesure peut-elle encore s'appliquer alors que ce seuil concernait la fin des années 1970 ? Comment peut-on parler de limite acceptable pour l'environnement insulaire quand certains *resorts* comptabilisent à eux seuls 700 chambres ?

9.5. Les initiatives environnementales

S'il est impossible de maîtriser les processus naturels, nous pouvons nous efforcer de contrôler les actions anthropiques sur les milieux insulaires coralliens, multiplier les campagnes de sensibilisation à l'environnement... Pour cela, un budget est nécessaire et si rien n'est actuellement décidé par le gouvernement maldivien, il nous semble intéressant de suggérer des mesures en ce sens. Il pourrait être ainsi envisagé de récupérer sur la taxe touristique, soit directe effectuée au niveau des hôtels, ou indirecte prélevée à l'aéroport, une somme dédiée à la promotion des pratiques d'une bonne gestion environnementale et à la restauration de certains sites endommagés par la mise en place de récifs artificiels. Ainsi, si l'on admet un prélèvement maximum d'un dollar, sur les six de la taxe journalière ou des dix de la taxe aéroportuaire, le ministère de l'Environnement pourrait récolter plus de 560 000 dollars à des fins environnementales.

Réduire les pressions anthropiques sur les littoraux passe également par une évolution des mentalités, des usages. Cela peut être orchestré par des campagnes télévisées, des affichages, des messages radiophoniques...

9.5.1. Les zones marines protégées

La gestion de la biodiversité n'est pas envisagée de la même façon entre les deux archipels. Quels sont les acteurs impliqués dans ces aires marines protégées et les impacts constatés ou prévisibles de ces modes de préservation sur les populations et les milieux naturels ?

9.5.1.1. Aux Tuvalu

On peut considérer que l'instauration d'une zone marine protégée implique une réflexion avancée en terme de gestion des espaces littoraux, mais, dans le cas des Tuvalu, rien n'avait jamais été entrepris. Il s'agit en fait d'une volonté régionale instaurée en 1986 lors de la Convention pour la

Protection des ressources naturelles et de l'Environnement dans le Pacifique Sud¹²². Ce sont ainsi 95 zones marines protégées qui se sont créées (Zurick D.N., 1995) ; ceci constitue une avancée même si leur impact a été limité car leurs moyens ne permettaient pas de pouvoir répertorier les espèces, d'observer les modifications...

Dans son article 14, il est indiqué que « *the parties shall, individually or jointly, take all appropriate measures to protect and preserve rare or fragile ecosystems and depleted, threatened or endangered flora and fauna as well as their habitat in the Convention Area. To this end, the parties shall establish protected areas, such as parks and reserves, and prohibit or regulate any activity likely to adverse effects on the species, ecosystems or biological processes that such areas are designed to protect* ». Les articles 192 et 194 alinéa 5 de la loi des Nations Unies sur la Convention de la mer s'inscrivent dans le même esprit puisqu'il est demandé respectivement que les parties « *protect and preserve the marine environment* » et « *protect and preserve rare or fragile ecosystems* » (Van Dyke J.M., 1991).

Comme nous l'avons vu tout au long de ce mémoire, la pression sur les récifs est de plus en plus pesante et ce à différents niveaux. Cela peut concerner les extractions mais également les nouvelles techniques et les nouveaux outils de pêche (Dahl A.L. et Salvat B., 1988). Si rien n'a jamais été entrepris au niveau des espaces insulaires, la gestion des ressources marines a une ancienneté dans les communautés polynésiennes, ce qui n'est pas le cas dans l'archipel des Maldives. S'il n'existe pas légalement de parc marin, à part dans l'atoll de Funafuti, les Tuvaluans appliquent un droit coutumier ayant une réglementation stricte pour les ressources marines et terrestres comme dans l'atoll de Nukulaelae où les quantités pêchées, la collecte des crabes et des racines utilisées en médecine sont répertoriées et contrôlées. L'utilisation des zones marines et terrestres évolue dans le temps, dans le même esprit que la jachère. C'est la communauté insulaire qui va décider du temps d'exploitation d'une zone de pêche, généralement de six mois, ainsi que de celle à venir... C'est dans ce même esprit que des zones protégées sont en train de se mettre en place dans les atolls de Nukufetau et de Nui. Sur l'île de Nanumanga, les habitants ont instauré eux-mêmes des limites de pêche, dans un but de préservation de la ressource, en interdisant sa pratique tous les mardis et mercredis.

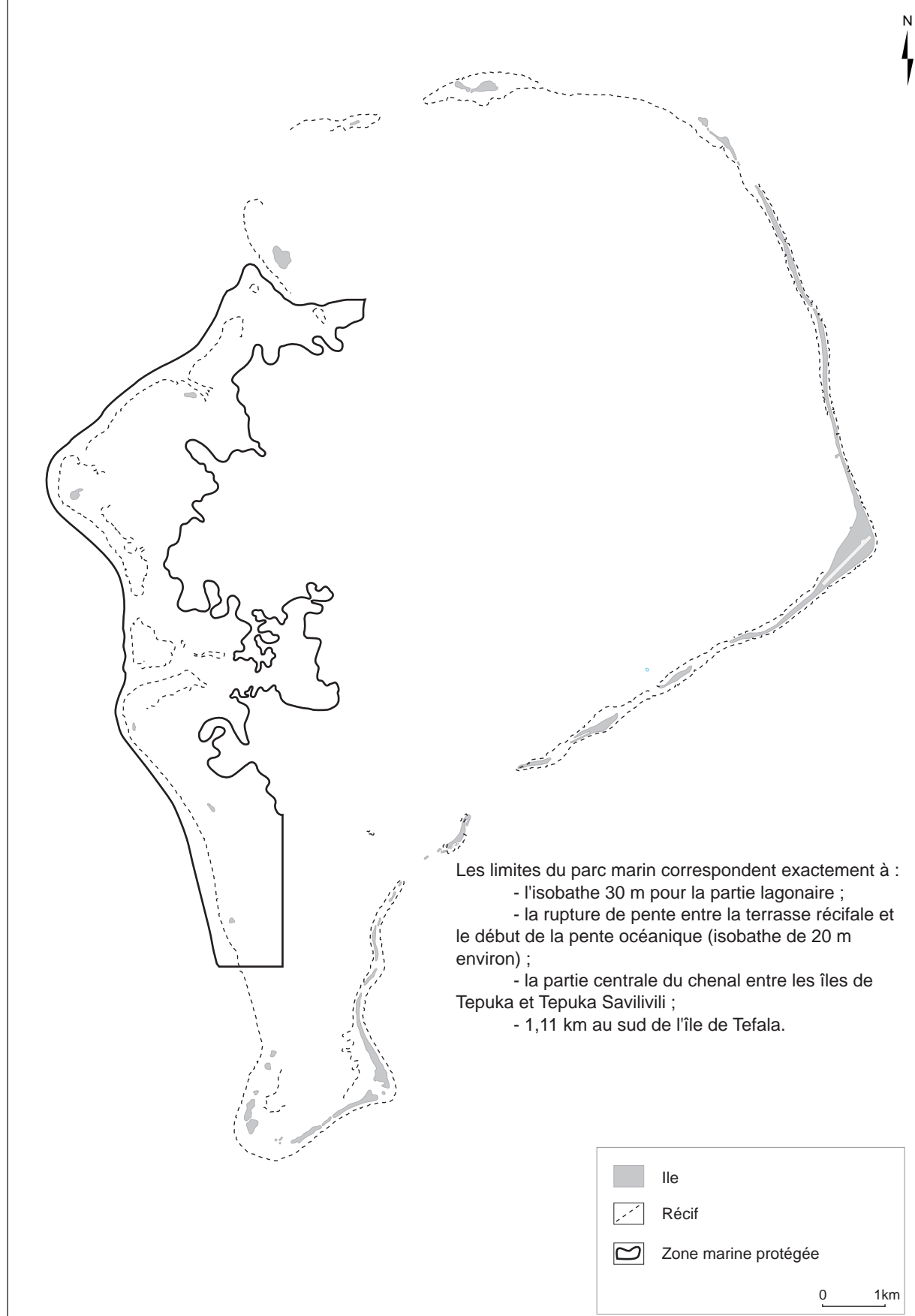
Ainsi, le soutien et l'intervention des populations locales dans le succès de ces programmes sont primordiaux. Les communautés doivent être persuadées qu'au-delà d'une conservation environnementale des espèces, ce sont leurs territoires qu'ils préservent.

Initiée en 1986 et institutionnalisée en 1996 sur la bordure occidentale de l'atoll de Funafuti, la réserve naturelle a été voulue par la population de Fongafale (cf. Figure 206). Le garde de la réserve¹²³ a plusieurs fonctions comme celle d'assurer la surveillance de la zone afin d'éviter les abus, de

¹²² Convention for the Protection of the Natural Resources and Environment of the South Pacific Region, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 25 Novembre 1986.

¹²³ Semese Alefaiao

Figure 206 : Limite approximative de la zone marine protégée dans l'atoll de Funafuti



sensibiliser la population à la destruction des écosystèmes et d'effectuer un nettoyage du site. Les activités interdites sont clairement établies et connues par la population de l'atoll. Dans la charte de la « *Funafuti Conservation Area*¹²⁴ » il est prohibé de :

- pêcher ou ramasser toute espèce marine,
- collecter ou perturber le corail,
- collecter les invertébrés aquatiques et les concombres de mer,
- collecter les crabes de cocotiers ou tous autres crabes,
- chasser ou perturber les oiseaux,
- chasser ou perturber les tortues,
- collecter ou perturber les œufs de tortues,
- couper ou brûler la végétation,
- couper ou brûler la végétation morte, sans l'accord préalable du garde de la réserve,
- récolter les fruits et/ou légumes,
- prélever des roches, des galets, du sable coralliens,
- jeter des déchets dans la mer ou sur la terre.

Toute personne ne respectant pas les règles édictées est passible d'une amende de 200 \$A et fait l'objet d'une poursuite judiciaire pouvant se solder par 2 000 \$A ou douze mois de prison.

A la différence de certaines réserves qui peuvent être perçues comme des territoires figés, certaines pratiques y sont autorisées comme :

- la récolte des cocotiers bruns,
- les pique-niques,
- la plongée libre,
- la plongée sous-marine accompagnée,
- les promenades sur les îles.

Très tôt, nous trouvons dans les textes de lois une volonté de sauvegarder ces écosystèmes comme l'acte juridique de 1978 (1) relatif aux pêcheries (révisé en 1990) qui vise à la promotion de l'activité tout en assurant son exploitation à venir. La déclaration de 1993 relative aux zones marines (2) considère le peuple tuvaluan comme souverain dans l'exploitation, l'exploration, la conservation et la gestion des ressources vivantes et non vivantes au sein de ses frontières. L'acte gouvernemental (3) donne le pouvoir à des gouvernements locaux d'améliorer, de contrôler et de limiter... la capture, la vente ou la mort des poissons. Enfin, des gouvernants locaux mis en place « par la loi » (4) peuvent avoir une action de police par des contrôles, notamment sur la pratique de pêche, la délimitation des zones où elle est autorisée, la possession des licences de pêche.

¹²⁴ Kogaa Koga Puipuigina o Funafuti en Tuvaluan

L'un des problèmes majeurs de la réserve concerne l'absence d'un recensement sérieux des espèces présentes liée à la faiblesse des moyens dont dispose le garde qui est le seul à assurer l'ensemble des tâches. Ceci peut être préjudiciable aux mesures de surveillance de l'élévation de la température des océans ou du blanchiment des coraux récifaux ou lagonaires.

En fait, il n'existe aucune mesure environnementale envisagée à l'échelle de l'archipel car les moyens financiers ne le permettent pas¹²⁵. Là encore, les interventions se font au coup par coup lorsque cela s'avère nécessaire sinon indispensable. En fait, lorsque le ministère des Ressources Naturelles et de l'Environnement souhaite développer un nouveau programme environnemental il fait une demande initiale auprès du gouvernement puis aux organismes internationaux comme l'UNDP ou le SPREP. Si le projet est accepté par les deux parties, l'organisme international devient alors le bailleur de fond et le gouvernement tuvaluan se charge de verser une somme de façade. Le personnel du ministère n'est désormais en charge que de l'élaboration de dossiers en vue de l'obtention de crédits, seul le garde de la réserve travaillant réellement pour l'environnement¹²⁶ tuvaluan.

Finalement, la mise en place d'une zone marine protégée aux Tuvalu dans la perspective de la gestion de la ressource a été d'autant mieux perçue qu'elle n'a pas modifié les habitudes de pêche ou de cueillette de la population. Si l'apport des ressources marines est très important dans la société tuvaluane où une famille consomme de façon journalière 1 kg de poissons (South R. et Skelton P., 2000), les pêches se pratiquent au plus proche du rivage ou dans l'océan, c'est-à-dire hors de la zone protégée.

Cependant, la raréfaction des espèces doit être considérée à l'échelle de la ZEE menacée par la vente des permis de pêche aux marins internationaux, ainsi que par le pillage illégal de la ressource, notamment en thons, par des navires étrangers malintentionnés. Si la marine australienne tente de contrôler ces pratiques par des surveillances dans les eaux tuvaluanes, rien ne semble pouvoir aller à leur rencontre.

9.5.1.2. Aux Maldives

Il y a deux lois majeures qui régissent la conservation et la gestion des récifs coralliens dans l'archipel des Maldives, la loi des pêches de 1987 et l'acte concernant la protection environnementale et la préservation des écosystèmes de 1993. Plusieurs ministères sont compétents pour ce qui est de la gestion des récifs coralliens et des ressources récifales. Il y a le Centre de Recherche Marine (1) qui appartient au ministère des Pêches, de l'Agriculture et des Ressources marines, la section Environnement (2) du ministère des Affaires internes, de l'Habitat et de l'Environnement, le ministère de la Construction et des Travaux publics (3), les autorités sanitaires (4) ainsi que le ministère du

¹²⁵ Entretien avec le garde de la Réserve

¹²⁶ Entretien avec Mr. Mateliu – Ministry of Natural Resources and Environment

Tourisme (5). Cette superposition de pouvoirs et de contrôles implique des lourdeurs administratives qui peuvent être préjudiciables à une gestion uniforme de l'archipel.

Le gouvernement maldivien a défini, au titre de l'« Environment Act » de 1993, vingt-cinq sites spécifiques comme zones marines protégées (cf. Figure 207). Dans ces zones, l'ancrage, la pêche, le ramassage des coraux et toutes autres activités comme l'extraction sont interdits. Il s'agit en fait de sites remarquables pour la plongée sous-marine, conservés en l'état pour les touristes. Leur localisation dans l'archipel est assez significative et confirme la volonté étatique de préserver des zones spécifiques particulièrement attractives, bien qu'à la base du projet les initiateurs australiens aient envisagé de protéger plus généralement des sites locaux et des sites touristiques sur l'ensemble de l'archipel.

La sauvegarde de ces 25 sites est primordiale car d'elle dépend la survie économique de l'Etat. Depuis leur classement et le départ en 2000 des initiateurs du projet, les choses ont peu évolué. Il n'y a pas de programme prévisionnel de surveillance, aucune mesure répressive n'est envisagée par le biais d'amendes ou de travaux d'intérêt général, il n'existe aucun garde pour les 25 réserves et aucune surveillance des sites n'est actuellement organisée par le ministère du Plan, des Ressources Humaines et de l'Environnement.

En 1999¹²⁷ puis en 2000, des programmes de gestion des ressources récifales ont été mis en place par des organismes internationaux. Le premier concernait les atolls de Vaavu, Meemu, Faafu et Dhaalu et se voulait être un modèle basé sur un développement économique-écologique des îles. En complément de ce programme, l'UNDP a souhaité intégrer une seconde réflexion de préservation basée sur la conservation et l'usage contrôlé de la biodiversité des récifs coralliens. Malheureusement, toutes ces mesures environnementales sont, peu ou prou, ignorées par les communautés insulaires qui ne se sentent pas concernées et qui ne comprennent pas le but recherché.

C'est dans le respect du territoire, de la faune et de la flore marines et insulaires que l'UNDP a mis en place un programme sur la gestion de la biodiversité sur le long terme, GEF¹²⁸-1, pour une période minimale de six ou sept ans, en partenariat international. Ce programme est la continuité de la CBD¹²⁹ qui a été ratifiée par les Maldives en 1992, et qui permet une approche multiple de la notion de conservation d'un site, et du NBSAP¹³⁰ mise en place en 2002. Au sein du GEF, un programme (*Atoll ecosystem-based conservation programme*) a été institué pour observer le comportement des récifs coralliens et estimer l'impact de leurs usages en vue d'un contrôle éventuel dans la perspective d'un développement durable. Ce programme concerne les atolls de Baa et Felidhu qui sont également

¹²⁷ National Integrated Reef Resources

¹²⁸ Global Environment Facility

¹²⁹ Convention on Biological Diversity

¹³⁰ National Biodiversity Strategy and Action Plan

Figure 207 : Localisation des zones marines protégées dans l'archipel des Maldives



concernés par le développement touristique. La stratégie de ce programme est basée sur trois points (U.N.D.P., 2001) :

- renforcer les politiques des différents secteurs compétents en vue de la préservation de la biodiversité,
- protéger au mieux la biodiversité marine et terrestre en établissant des zones protégées qui seront définies et contrôlées par les différents partenaires (étatiques, locaux),
- soulager les pressions exercées sur le milieu en développant divers palliatifs.

En somme, ce programme souhaite impliquer la population locale dans les décisions qui seront adoptées concernant l'environnement de leur atoll, évitant ainsi que le pouvoir central décide de façon arbitraire les zones à protéger.

Il faudrait en parallèle envisager des campagnes de sensibilisation à l'environnement auprès de la population de l'ensemble des îles locales et plus spécialement sur Malé. Les mentalités doivent évoluer en préconisant des programmes environnementaux éducatifs enseignés dès les petites classes. On sait pertinemment que ce sont les enfants qui peuvent faire évoluer leurs parents sur diverses questions environnementales comme par exemple celle concernant les traitements de déchets...

Quel que soit le modèle de gestion envisagée pour les deux archipels, il faut, pour que son succès soit total, impliquer la population locale dans les actions engagées. Il faut alors l'adapter à leur culture, à leur mode de vie, à leur sensibilité. D'après un rapport émis par l'UNDP (U.N.D.P., 1999), la dégradation de l'environnement dans l'archipel des Maldives n'est pas connue de sa population. Comment pourrait-elle l'être sans campagne de sensibilisation, sans explication sur son mode de fonctionnement, sans des connaissances préalables ? Les insulaires sont des consommateurs de cet espace, comme nos arrière-grands-parents ou nos grands-parents l'étaient. Toutefois, la donne a évolué puisque les îles sont désormais surpeuplées et qu'aux risques anthropiques se surimposent des risques naturels.

9.6. Limiter la dépendance économique

Les micro-Etats insulaires sont souvent tributaires d'un ou de secteurs économiques exerçant une pression sur leurs milieux insulaires. Afin d'éviter cette dépendance, d'autres activités peuvent être envisagées comme par exemple le développement de la culture de l'huître perlière. La taille des lagons est suffisamment importante aux Maldives et aux Tuvalu, notamment dans ceux des atolls de Funafuti ou de Nukulaelae, pour envisager l'implantation de quelques fermes perlières comme cela s'est fait aux îles Fidji, aux Salomons, en Nouvelle-Calédonie ou en Polynésie française. Il ne s'agit pas de proposer un développement comparable à celui de la Polynésie française mais plutôt de se focaliser sur

l'exploitation qualitative. C'est d'ailleurs dans ce but de diversification que le projet de perliculture¹³¹ a été initié entre le gouvernement maldivien, l'UNDP et une firme japonaise¹³² en 1995. Largement inspirés de leurs expériences dans les lagons d'atolls de Polynésie française, les Japonais ont choisi l'atoll de Vaavu pour les premières expérimentations sur perle blanche du fait de la morphologie du lagon et de la qualité de ses eaux. A la lumière des premiers résultats, obtenus en 1999, la première grosse production est attendue d'ici à cinq ans avec la mise en place de vente directe aux hôtels. L'instauration d'un tel projet, à mi-chemin entre les deux secteurs économiques les plus porteurs, permet de fournir du travail à la population locale en favorisant le développement anthropique durable d'un atoll autour de la perle de culture.

Il a été trop souvent répété que les modifications actuelles des territoires insulaires étaient imputables aux grandes puissances économiques responsables des émissions de gaz à effet de serre. Cette vision bien que certainement réelle, est réductrice car elle ne tient pas compte des propres actions des populations qui ne prennent pas leurs responsabilités face aux modifications de leur environnement. Il faut avouer que les perturbations qu'ils causent à leur milieu sont tout aussi préjudiciables que les changements globaux.

Pour se donner bonne conscience, certains instaurent la journée de l'environnement alors qu'à côté de cela les extractions se poursuivent, les modifications dans la politique de la famille n'évoluent pas, les structures touristiques se multiplient, les déchets s'amoncellent.

Nos archipels sont assistés et se complaisent dans cet assistanat. Certes, les aides internationales sont inévitables, mais les responsables insulaires doivent s'investir d'avantage et éviter de faire preuve d'attentisme.

¹³¹ Pearl Culture Project

¹³² Japanese Human Resource Development

Chapitre 10 – Des changements eustatiques à tout prix !

Ce chapitre se construit autour de réflexions diverses menées sur les changements climatiques et eustatiques mondiaux. Il se veut volontairement excessif.

Dès la fin de la décennie 1980, des rapports prévisionnels sur l'élévation du niveau de la mer et la vulnérabilité des côtes sont entrepris. Certains concernent l'archipel des Maldives (Ali M. et Maniku M.H., 1989 ; Anonyme, 1989 ; Edwards A. J., 1989 ; Ministry of Economic Affairs. et Unep, 1989 ; Pernetta J.C. et Sestini G., 1989 ; Roy P. et Connell J., 1989 ; Titus J., 1989 ; Woodroffe C.D., 1989), d'autres les Tuvalu (Pernetta J.C., 1989c), alors que d'autres se rapportent à l'ensemble des micro-Etats insulaires (Brown B.E., 1989 ; Lewis J., 1989 ; Pernetta J.C., 1989b ; Roy P. et Connell J., 1989, 1991 ; Pernetta J.C., 1992).

Leurs conclusions conduisent les organismes officiels, (Ministry of Economic Affairs. et Unep, 1989) à estimer que 34,3 % de l'économie nationale des Maldives doit être investie pour une protection adéquate des côtes, 18,8 % aux Kiribati, 14,4 % aux Tuvalu et 11,1 % aux Tokelau.

Ces rapports, pris comme références, envisagent les changements climatiques et eustatiques globaux dans l'esprit catastrophiste de la fin des années 1980. Ainsi on peut y lire que « *some of the most recently populated islands in the world may be depopulated [...] and some of its most recently formed islands may disappear forever* ». Les réponses politiques n'ont pas tardé et c'est le président M.A. Gayoom qui est devenu le porte-parole des micro-Etats insulaires sinistrés (Anonyme, 1989). Il dénonce les progrès industriels, les changements environnementaux et réclame l'avis d'experts¹³³ :

« *I would suggest [...] that we request the Secretary General to set up a group of experts to do a indepth study of the problem with a particular emphasis on the effects of the projected sea level rise on low-lying countries of the Commonwealth and the dangers it poses to the physical infrastructure and resources of those countries and identify effective, practical and feasible protective measures that could be taken to safeguard the territories, the economies and above all, the people of those countries* ».

Dans une lutte pour la survie de son pays, le Président M.A. Gayoom multiplie les discours, les conférences. En 1998, il considère l'archipel maldivien comme « *a nation in peril. Every effort however small, to live in harmony with nature, instead of polluting it, will help ensure that the time when the ocean rise up and wash away the land, may never happen* ».

Afin de ne pas être les laissés- pour- compte de la planète, les représentants des micro-Etats insulaires organisent des conférences, des rencontres intergouvernementales, mais, comme le souligne le

¹³³ Discours du Président Maumoon Abdul Gayoom en 1987

ministre de l'Environnement tuvaluan, « ces conférences attirent toujours les mêmes Etats ou les mêmes organisations internationales qui connaissent déjà largement nos problèmes ».

Les Tuvalu et les Maldives ne sont pas les seuls micro-Etats insulaires à vivre dans la crainte de pressions environnementales grandissantes. Ainsi, les Tokelau, archipel voisin des Tuvalu, ont la douteuse distinction d'être les premiers à disparaître en cas d'élévation avérée du niveau de la mer (Zurick D.N., 1995).

10.1. Les impacts économiques des changements climatiques

Les îles des micro-Etats insulaires sont très dépendantes des récifs coralliens car ils leur apportent à la fois leur nourriture et leur assurent leur protection par la barrière protectrice naturelle.

Si les dommages engendrés par les changements climatiques sont connus, les risques concernant la population le sont moins. Ainsi, l'augmentation de l'intensité des vents pourrait avoir des conséquences sur la production de cocotiers qui reste l'arbre providentiel pour des îles basses. Comme il demande au moins huit ans avant de produire, la destruction de certaines plantations par des tempêtes ou des cyclones pourrait avoir une incidence sur la vie insulaire des habitants des îles les plus éloignées des îles capitales, comme cela est intervenu lors de forts coups de vents dans les îles des Tuvalu où sa disparition a été cause de famine et d'exode insulaire. L'intrusion d'eau salée pourrait avoir des conséquences sur la production de pulaka ou de taro. La réduction, voire la disparition de ces cultures, pourrait avoir non seulement des répercussions importantes sur le mode de consommation mais également sur la société tuvaluane qui s'organise autour de ce tubercule.

C'est dans la perspective de mieux connaître l'impact économique des changements climatiques que les conséquences du phénomène El Nino de 1982-1983 ont été chiffrées. Les événements cataclysmiques qu'il a provoqués (cyclones, précipitations abondantes, sécheresses...) ont été estimés à une douzaine dans le monde. Ils ont coûté environ 8 milliards de dollars et ont tué plus de 1 000 personnes (Collectif, 1983).

Les *scénarii* établis après l'événement de 1998 aux Maldives devaient être nécessairement très préjudiciables pour un pays tirant ses ressources de la mer, sur le stock de poissons, sur l'industrie touristique et sur l'évolution des côtes (Wilkinson C.R. *et al.*, 1999), bien que, comme nous l'avons dit précédemment, les observations que nous avons menées en plongée en 2001 nous rendent confiante sur le repeuplement des sites.

L'estimation des dommages occasionnés, calculée à partir d'indices élaborés par R. Costanza *et al.* (1997), a permis de dégager deux *scénarii* économiques à l'échelle de l'océan Indien, bien que C.R. Wilkinson *et al.* (1999) estiment que les Maldives et les Seychelles ont été les deux Etats à avoir subi le plus de dommages.

Dans le scénario optimiste, on estime la perte à 706 millions \$ US avec des répercussions sur une vingtaine d'années, alors que le scénario plus pessimiste considère la perte à plus de 8 milliards \$ US. Suivant les écosystèmes, les dommages vont avoir un coût plus ou moins important avec une valeur moyenne estimée à 375×10^9 \$US/an à laquelle il faudra rajouter des valeurs théoriques suivant les sites considérés. Ainsi, pour des récifs coralliens, il conviendra d'ajouter 6 075 \$/ha⁻¹/an⁻¹. Si des îles, localisées dans des atolls, ont leurs côtes polluées par des lits d'algues marines, on rajoute à la valeur du remboursement initial 19 004\$/ ha⁻¹/an⁻¹.

La phase de blanchiment de 1998 n'a pas eu de répercussions sur le flux touristique malgré ce que semblaient croire les hôteliers. La valeur du préjudice semble alors disproportionnée lorsque les secteurs économiques n'ont pas été mis à mal.

Dans le cas d'une élévation effective du niveau de la mer aux Maldives, les îles d'Hulhulé, d'Hulhumalé et de Malé seront certainement celles qui bénéficieront en premier d'aménagements par la mise en place de protections et/ou l'instauration d'un rehaussement avec l'apport de matériaux supplémentaires. Du fait de l'importance qu'elles revêtent dans l'archipel en assurant les échanges des biens et des personnes, leur dysfonctionnement aurait en effet de nombreuses répercussions sur le fonctionnement de l'Etat. Au sein des zones à protéger en priorité, des choix économiques et politiques s'imposent. Ainsi, les îles d'Hulhulé et d'Hulhumalé apparaissent comme les zones à risques prioritaires, auxquelles il serait convenable d'ajouter les aéroports régionaux car ils assurent la distribution des biens alimentaires et font fonctionner l'Etat par l'arrivée des touristes. L'île de Malé qui concentre tous les pouvoirs serait mise sous surveillance car l'artificialisation totale de ses côtes la protège pour un temps de l'attaque des vagues et des houles.

Le cas des îles locales anthropisées serait ensuite considéré. La concentration anthropique voulue par l'Etat a été théoriquement envisagée dans le but de réduire le coût des protections, même si les maldiviens la considèrent comme un contrôle du pouvoir central. Les îles-hôtels seraient individuellement concernées par ces protections. Autonomes, elles assumeraient les aménagements nécessaires dans une conscience environnementaliste forte, du moins pour certaines, afin de préserver le tourisme.

C'est dans un but de sauvegarde des sites que les ingénieurs ont pensé la construction d'Hulhumalé et de Thilafushi à 2 m au-dessus du niveau marégraphique moyen qui avoisine déjà 1,8 m. N'est-il pas curieux pour une nation si craintive de la remontée du niveau de la mer de construire un complexe économique regroupant des pôles industriel-portuaire, aéroportuaire et habitable si proches du niveau actuel ? Considèrent-ils vraiment que le niveau de la mer monte ?

Nous ne pouvons donner légitimité aux bruits des rues, mais lorsque nous étions à Malé il était dit que c'est au cours des années 1980, lorsque les premiers échos des changements environnementaux se sont fait entendre, que le Président de la République a décidé de parler de la disparition prochaine de

l'archipel. Aurait-il saisi cette opportunité pour faire connaître son pays sur la scène internationale afin de bénéficier des aides et développer un tourisme de paradis perdu ?

Au même titre que ce qui est pratiqué en France, les micro-Etats insulaires envisagent de se faire dédommager des biens perdus lors d'événements climatiques ou eustatiques majeurs, par les pays responsables selon eux de leurs préjudices. Pour cela, non seulement il va falloir déterminer les zones à risques mais évaluer les biens de ces zones et identifier les pays qui seront reconnus responsables. Certes, il y a les non-signataires du protocole de Kyoto comme les Etats-Unis ou l'Australie mais pourront-ils véritablement se retourner contre eux, notamment les Tuvalu sachant que l'Australie est un de ses plus gros bailleurs de fonds ?

L'estimation économique des risques côtiers va se révéler ardue car les références bibliographiques les concernant sont assez peu nombreuses en géographie, et portent uniquement sur les pays européens. Comme il n'existe ni aux Tuvalu, ni aux Maldives d'agences immobilières, il est difficile d'estimer la valeur d'une propriété sauf dans le cas des Maldives où la terre peut être louée. La mise en place d'une échelle de la valeur des terres peut exacerber un conflit déjà latent entre les îliens et les structures hôtelières. En effet, dans cette pratique économique, une terre destinée à un usage récréatif au profit du tourisme aurait un coût nettement supérieur à la terre louée pour un usage agricole. Si cette situation est courante chez nous, elle peut provoquer chez les insulaires un sentiment d'inégalité, qui risque d'entraîner de leur part des réactions négatives vis-à-vis des implantations touristiques.

D'après A. Miossec (2000), le prix du mètre linéaire pour les ouvrages longitudinaux de haut de plage, perrés en béton ou maçonnés, pour des côtes à faible marnage est d'environ 1 067 euros ; les perrés en enrochements sont moins chers : entre 381 et 1 067 euros. Pour ce qui est des épis, le prix du mètre linéaire varie entre les épis maçonnés, entre 914 et 1 219 euros, et ceux qui sont enrochés, entre 1 219 et 2 744 euros. Dans la capitale des Maldives, le coût d'un mètre linéaire de protection sur le « great wall » est d'environ 9 000 US\$, soit environ 7 466 euros alors qu'aux Tuvalu (Reynolds C., 1988), le mètre linéaire de protection longitudinale coûte 880 US\$ (environ 730 euros) pour les perrés en béton, et 180 US\$ (environ 149 euros) pour les perrés en corail.

Si le remboursement des aménagements peut être envisagé, comment faire pour dédommager de la perte de la terre qui est pour ces territoires le bien le plus précieux ?

A l'instar de nos sociétés modernes, les micro-Etats insulaires exigent un niveau de protection de plus en plus élevé face aux risques naturels.

10.2. Les changements climatiques ou eustatiques responsables de tous les maux des îles

Toutes les modifications insulaires ont une origine qu'il faut rechercher soit dans l'élévation du niveau de la mer, soit dans l'augmentation de la fréquence des tempêtes, soit dans la réduction des précipitations. Pour certains, la disparition des plages sableuses lagonaires dans l'île de Fongafale est

due à une érosion née de l'élévation du niveau de la mer. D'autres, par contre, se rappellent que les plages ont disparu lors de la Seconde Guerre mondiale lorsque les Américains ont creusé des chenaux dans le lagon afin de permettre aux bateaux de décharger à la côte.

Dans le domaine de l'eau, il est vrai que la raréfaction des pluies va avoir des répercussions sur l'approvisionnement de la lentille d'eau douce. L'eau salée plus dense, qui porte la nappe phréatique amincie, va alors remonter vers la surface. Proche du sol, elle va le saliniser et rendre les cultures impropres à la consommation comme le rapportent certains habitants des îles de Nui, Vaitupu et Fongafale. Mais, pour d'autres, ce phénomène n'est pas récent. La lentille d'eau douce semble être extrêmement réduite dans l'île de Fongafale (Falkland A.C., 1999) et il n'est pas rare qu'on note la présence d'eau saumâtre dans les trous de pulaka ou de taros ainsi que dans les puits d'approvisionnement en eau. Les habitants de Fongafale signalaient à l'auteur du rapport que de tels changements de salinité étaient fréquents et apparaissaient à chaque période transitoire entre les fortes et les faibles précipitations, et inversement. Durant les entretiens, les personnes âgées mentionnaient que les puits localisés à Fongafale n'étaient plus utilisés pour la consommation courante depuis la Seconde Guerre mondiale car ils étaient soit pollués, soit saumâtres, soit trop salés selon les mois.

Toutefois, lorsque la lentille d'eau douce est proche de la surface et que cela coïncide avec des grandes marées de vives eaux comme par exemple aux mois de février - mars, la lentille peut suinter à travers le sol de l'île, inondant les parties où elle existe encore. Ainsi, l'eau des inondations ne vient pas de la mer mais par le sol et par percolation. Elle peut être douce, saumâtre ou salée.

C'est ce qui s'est produit au cours de l'année 2001 où l'île de Fongafale a été touchée à deux reprises, le 9 février et le 9 mars par des marées mesurant respectivement 3,326 m et 3,348 m. Les inondations ont été accompagnées d'une période de forte houle qui a également submergé certaines parties de l'île. La responsable du service météorologique parle d'une recrudescence d'infiltrations des eaux à travers le socle de l'île, de sécheresses, ainsi que d'inondations par de fortes pluies. Depuis la nouvelle décennie, elle insiste sur l'augmentation de la fréquence des infiltrations qui, d'une périodicité comprise entre six ou sept ans, passe désormais à deux ou trois ans.

Il ne faut pas négliger l'impact pour l'hydrologie de l'île de la nouvelle politique de défrichement instituée par le gouvernement, consistant à abattre sur un endroit déterminé tous les cocotiers et les pandanus, afin de développer des micro-centres urbains tout au long de la seule route existante.

Nous insistons également sur le fait qu'il ne faut pas confondre élévation du niveau de la mer et grandes marées. Ainsi, le 20 février 2004, toutes les télévisions françaises et les médias ont parlé des Tuvalu comme d'un « archipel menacé par les eaux » du fait d'une marée de 3,07 m. Certes, la marée peut avoir des répercussions sur le territoire, notamment si elle est accompagnée d'une forte houle, d'une basse pression atmosphérique, de vagues lagonaires ou océaniques ou d'une remontée de la lentille d'eau douce proche de la surface, mais une grande marée ne s'accompagne pas nécessairement

d'une inondation. D'ailleurs, dans ce cas, les terres n'ont été ni submergées, ni inondées, et tout ce qui a été annoncé à la télévision¹³⁴ n'est jamais arrivé¹³⁵. En février 2004, le Premier Ministre des Tuvalu a accusé le réchauffement planétaire d'être responsable des grandes marées. Si les variations entre les maxima et les minima des marées peuvent s'accroître et provoquer à terme des modifications observables, les phénomènes actuels ne semblent pas être obligatoirement le fait du « global warming ».

Nous pensons que cette vision cataclysmique est exacerbée par la pénétration des eaux marines dans les *borrow pits* à travers le socle de l'atoll lors des marées de vives eaux (cf. Figure 208).

On peut lire à propos des Tuvalu (Lewis, 1988 in Woodroffe C.D., 1989) : *“the sea is not a benign or constant phenomenon. Abnormal, twice yearly high tides on top of a raised sea level of any dimension, would cause deeper and more extensive sea flooding than that which now occurs. Storm waves would cause more coastal erosion (and thus induce more flooding), salt spray would be more penetrating and thus more damaging and sea surge, associated with a higher incidence of tropical cyclones in seas of higher temperatures would inundate and cause catastrophic damage to more islands”*.

Comme nous l'avons dit précédemment, tous les problèmes insulaires sont censés découler directement de l'élévation du niveau de la mer ou des changements climatiques à tel point que ceux qui contestent cette théorie peuvent être déconsidérés. En 1999, lorsqu'un journaliste étranger suggère d'autres raisons à la dégradation des espaces côtiers kiribatiens, et plus particulièrement des raisons anthropiques, le président, Son Excellence Teburoro Tito, l'a expulsé en le déclarant « immigrant indésirable » (Field M., 2002).

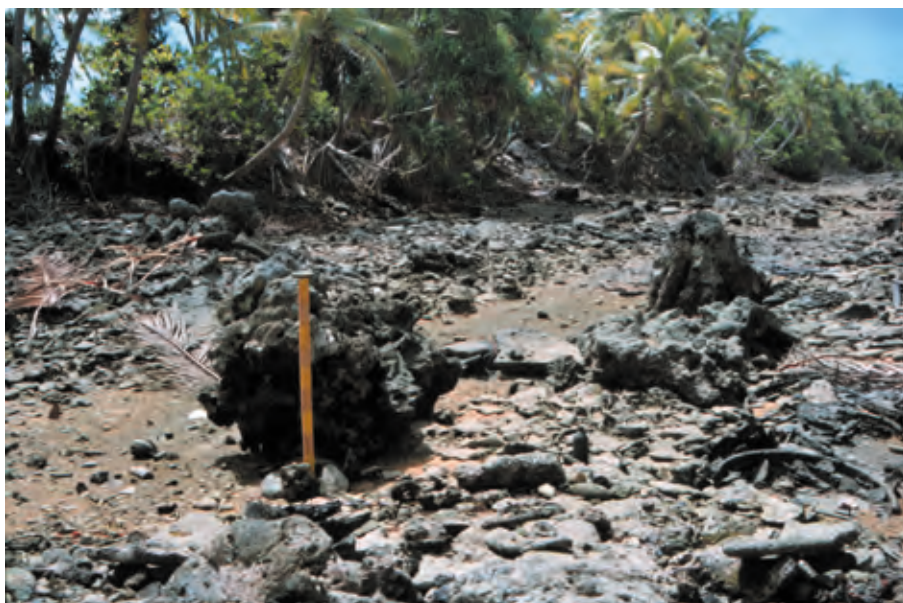
Aux Maldives, il est très rare de rencontrer des opposants à l'hypothèse de l'élévation du niveau de la mer. Quand il en existe, les rencontres se font à l'extérieur de Malé, dans l'hôtel d'Hulhumalé. Ainsi, toutes les discussions que nous avons pu avoir concernant ce sujet ou d'autres, comme par exemple la non disponibilité de certaines données scientifiques, se sont faites dans ces conditions. Quand les critiques sont trop présentes, les étrangers peuvent craindre l'expulsion tandis que les Maldiviens risquent l'exil vers une île lointaine.

Dans le cadre de la mission INQUA, nous avons toujours mesuré nos propos car toute opinion, même très légèrement contradictoire, est perçue comme une trahison. Lors de notre première mission, les gouvernants ont été très accueillants. Ils nous avaient fourni un bateau du ministère de l'Environnement, avec notre propre station de gonflage, et nous étions hébergée au sein de familles maldiviennes dans des îles locales. En 2001, alors que nous affichions un certain scepticisme sur une

¹³⁴ Il s'agissait d'un reportage réalisé en 2001 lors de la précédente infiltration.

¹³⁵ Entretien téléphonique avec Marica Seluka habitant l'île de Fongafale

Figure 208 : La porosité des structures récifales, atoll de Funafuti
Pénétration de l'eau de mer par marée montante dans le borrow pit de l'île de Tengako



Photographie prise le 07/10/01 à 13h55



Photographie prise le 07/10/01 à 13h55



Photographie prise le 07/10/01 à 07h36

élévation significative du niveau de la mer, la mission de terrain a été beaucoup plus difficile à entreprendre. Nous avons dû louer un safari-boat afin de nous déplacer vers nos sites d'études. Il nous était interdit de débarquer sur les îles locales et sur certaines îles inhabitées, pourtant explorées lors de la précédente mission. Après le départ des autres membres du programme, nous devions de notre côté terminer nos travaux sur le suivi topographique des îles de Rasfari et de Vilingili. Le bateau qui assurait notre transport vers l'île de Rasfari nous fut confisqué, plus aucune personne du ministère ou de toute administration ne souhaitait travailler avec nous. Des conditions nous furent imposées comme par exemple l'interdiction de séjourner plus d'une journée sur l'île de Rasfari. Les échantillons sédimentaires que nous avons collectés, afin d'effectuer une comparaison avec ceux prélevés en mai 2000, nous furent confisqués à l'aéroport. Curieusement, il s'agissait du second stock sédimentaire qui n'arrivait pas à destination pour effectuer des observations et cela malgré une autorisation du ministère de l'Environnement. Le manque de comparatif dans l'échantillonnage explique en partie l'absence d'analyses sédimentologiques dans ce travail.

Au cours de nos entretiens aux Tuvalu, il nous a été rapporté des faits océaniques que les insulaires ont assimilés à l'élévation du niveau de la mer, mais que nous considérons du fait de leur description comme des phénomènes sismiques localisés. Ainsi, des hommes ont vu s'abattre sur le récif oriental de l'île de Fongafale en août 2001 à 09h00 une série de vagues dont l'une a pénétré dans les terres, alors que la mer était calme. Trente minutes plus tard, une seconde série de vagues a frappé de nouveau le récif et une d'entre elles a inondé l'île de Fongafale jusqu'à la route principale. Nous pensons à un phénomène de type micro-tsunami né d'un effondrement sous-marin qui aurait pu créer, à un intervalle de temps d'une demi heure, de telles vagues. Ce type de phénomène nous avait été rapporté précédemment par plusieurs interlocuteurs lors de notre premier séjour dans l'archipel tuvaluan en 1999. La description qu'ils nous en avaient faite nous avait également laissé penser à un micro-tsunami. En effet, il nous avait été rapporté qu'une partie des eaux du lagon s'était retirée laissant place quelques minutes plus tard à trois grosses vagues qui avaient pénétré l'île de Funafara, dans l'atoll de Funafuti, et l'avaient traversée sur toute sa largeur. Des observations similaires ont été faites par les habitants de l'île de Niulakita localisée dans le sud de l'atoll de Funafuti.

Ces micro phénomènes semblent récurrents dans l'archipel puisqu'aux deux événements précédents il faut ajouter ceux du 26 novembre 1999 et du 23 juin 2001, issus tous deux de tremblements de terre d'une magnitude respective de 7,3 (Vanuatu) et 8,4 (Pérou) sur l'échelle de Richter. Dans les deux cas, les vagues qui ont atteint les côtes tuvaluanes étaient inférieures à 10 cm.

Aux Maldives, le fait est beaucoup plus rare puisqu'un seul tsunami a été répertorié. Il s'agit de celui né après un tremblement de terre qui a affecté la ride de Carlsberg le 15 juillet 2003 et qui a été la cause d'une légère secousse sismique dans l'archipel sans pour autant créer de vague.

Si la taille plus réduite de l'océan Indien ne permet pas à un tsunami de prendre suffisamment de vitesse et d'ampleur pour être la cause d'importants dommages, cela est différent à l'échelle de l'océan Pacifique. Malheureusement imprévisibles, ces vagues gigantesques constituent un risque majeur pour les atolls.

10.3. Vers la reconnaissance des réfugiés environnementaux ?

Ce dernier terme est revenu sur le devant de la scène internationale lorsque sept familles tuvaluanes ont demandé asile à l'île-Etat de Nui en 1998 (SPREP, 1998), mais il n'a aucun statut juridique en droit international. Il avait été initialement formulé par J. Pernetta (1988 *in* P. Roy et J. Connell, 1991) et Tickell C. (1989¹³⁶ *in* Lewis J., 1989) qui parlaient de « réfugiés écologiques ». Depuis, les nouveaux réfugiés environnementaux de nationalité tuvaluane trouvent refuge sur le sol néo-zélandais. Pour cela, un accord a été passé entre les deux Etats afin que chaque année 75 Tuvaluans puissent être accueillis par tirage au sort. Le 3 juillet 2004, les mesures concernant cette terre d'accueil ont été précisées. Ainsi, les Tuvaluans désirant s'établir sur le sol néo-zélandais doivent le faire au titre de travailleurs immigrés et non plus de réfugiés environnementaux, qui font l'objet d'une protection particulière pour le gouvernement de Wellington. Ils doivent avoir entre 18 et 45 ans, parler l'anglais et avoir un bagage professionnel. Pour la population tuvaluane, cette nouvelle mesure discriminatoire est difficile à accepter mais que faire en contrepartie, alors que le gouvernement australien a refusé son aide considérant que la submersion n'était pas immédiate ? Cet accord est venu entériner plusieurs mois de pourparlers, après que la Nouvelle-Zélande a proposé préalablement au gouvernement tuvaluane la vente d'un espace de terre où toute la communauté aurait été regroupée, créant ainsi une véritable réserve tuvaluane en territoire Maori, un comble pour une population polynésienne ! A l'heure actuelle, on dénombre plus de 3 000 Tuvaluans vivant à l'étranger alors que le quota instauré avec la Nouvelle-Zélande est appliqué.

Dans sa quête de survie et de reconnaissance, le gouvernement tuvaluane étudie la possibilité d'assigner en justice les Etats-Unis d'Amérique et l'Australie pour non-ratification de protocoles internationaux et plus particulièrement celui de Kyoto, qui n'est par ailleurs plus adapté aux seuils des émissions de gaz à effet de serre actuels. Cette assignation est liée à leur éventuelle disparition. S'ils sont contraints de quitter leur terre du fait de l'élévation du niveau de la mer comme une conséquence du « global warming », ils souhaitent incriminer ces deux puissances, qui seraient alors d'après eux juridiquement et pénalement responsables devant le droit international de les avoir chassés volontairement de leur terre natale.

Pourtant, même à leur échelle, les micro-Etats insulaires contribuent à l'augmentation des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère par l'augmentation croissante de véhicules motorisés dans les

¹³⁶ Tickell C. (1989) "Environmental refugees : the human impact of global climate change". The NERC Annual Lecture.

capitales, et l'usage des incinérateurs à ciel ouvert. Dans une volonté de « protection du climat » revendiqué par le sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, puis par Kyoto 1 en 2001 et prochainement Kyoto 2, impliquant l'entrée de pays émergents, les micro-Etats insulaires doivent se responsabiliser.

Les Tuvalu et les Maldives ne sont pas les seuls Etats à faire face aux grandes puissances. L'alliance des petits états insulaires, créée en 1994, compte 43 pays localisés dans tous les océans du monde. Ils se sont regroupés afin de se faire entendre, d'une voix unanime, par les grandes puissances responsables selon eux de leur future disparition et des nuisances dont ils sont victimes. Ils réclament des fonds pour doter leurs pays de désalinisateurs, de panneaux solaires, de digues protectrices relevant des « seawalls projects »...

Si la crainte de certains micro-Etats insulaires semble légitime, nous pouvons toutefois nous interroger sur le fondement réel du « global warming ». Ne serait-ce pas avant tout une manne financière extrêmement profitable pour des micro-Etats insulaires dépendants économiquement ?

Nous ne souhaitons pas remettre en cause l'élévation du niveau de la mer ou les modifications climatiques à venir, mais nous souhaitons éclairer, autant que faire se peut, les communautés insulaires sur les risques inconsidérés qu'elles font peser actuellement sur leurs territoires. Il faut que les mentalités des insulaires évoluent s'ils souhaitent rester sur leurs territoires et pour cela il faut qu'ils apportent des modifications drastiques à leurs habitudes et dans leurs relations avec leurs milieux. Comme le souligne l'IPCC (2001), la plupart des changements littoraux observés sur les micro-Etats insulaires sont dûs aux activités humaines.

La démonstration développée ci-dessus a été faite dans un but de provoquer des réactions, car, si à l'heure actuelle, tout est attribué trop facilement par les gouvernements des micro-Etats insulaires aux changements globaux, rien ne dit que d'autres causes ne puissent être avancées. Nous ne considérons pas que l'un des *scénarii*s puisse prendre le dessus sur l'autre, du moins pas au stade des avancées scientifiques actuelles. Alerter et mettre en garde les insulaires sur leurs pratiques littoralistes destructrices ne peut être que positif dans une perspective de contrôle renforcé.

Nous pensons que l'IPCC a alerté trop tôt l'opinion publique des changements à venir, sans que les hypothèses qu'il a avancées aient été totalement vérifiées avec toute la rigueur scientifique indispensable, notamment dans le cas de ces micro-Etats. La réponse aux prises de position alarmistes de la part de l'IPCC ou d'autres organismes scientifiques pose de nombreux problèmes pour les territoires insulaires. Ils maintiennent une crainte permanente, dans un esprit de sauvegarde cependant fort louable, qui se traduit par des artificialisations incontrôlées des littoraux, impliquant des prélèvements coralliens inconsidérés sur la structure récifale. Ces opérations, qui ont des répercussions

en aval, conduisent à une situation dégradée du système littoral que tout le monde considère comme étant la conséquence d'une remontée du niveau de la mer.

Il semble également, au regard de nos analyses climatiques et eustatiques ainsi qu'à l'examen des données récoltées à travers le monde, que le terme de « global warming » ne puisse s'employer à l'heure actuelle.

En cas toutefois de changements avérés, les inégalités ne vont-elles pas apparaître de façon criante entre les Etats développés qui pourront protéger leurs côtes, à l'aide d'ouvrages massifs, et les Etats en développement qui n'auront pas les moyens de se mettre à l'abri ? Certes, des aides internationales se développeront au profit de ces derniers, mais à quel prix ? Devront-ils accepter que l'on pille leurs eaux poissonneuses pour survivre à la submersion ? Devront-ils accueillir un courant d'immigration en provenance de certaines grandes puissances économiques, en contrepartie de la fourniture de terre, de matériaux ou de tétrapodes ? Finalement, les gouvernants des micro-Etats insulaires seront-ils contraints de tout accepter pour que leurs populations restent là où elles sont nées ?

Il n'est pas déraisonnable d'affirmer que l'homme est le responsable de nombreux troubles sur les littoraux étudiés, mais l'absence de données concernant leur évolution sur le long terme nous impose la mesure. Cependant, d'après les observations faites sur le terrain, il apparaît que la vulnérabilité des littoraux est accentuée par les pratiques de prélèvements inconsidérés de matériaux coralliens, anciens ou actuels, par des aménagements anarchiques, par la volonté de voir les archipels et les îles exploités au maximum de leur capacité de développement matériel et humain.

Quand une érosion se produit, les matériaux nécessaires à la protection sont prélevés en avant du trait de côte dans le pire des cas, dans le système récifal dans le meilleur des cas.

S'il est légitime de mettre en place une stratégie d'aménagement systématique pour répondre aux indices morphologiques laissant supposer une élévation du niveau de la mer, il semble par contre dangereux d'utiliser ce dernier prétexte non avéré pour réaliser des travaux compromettant l'équilibre naturel des atolls.

CONCLUSION GENERALE

L'étude détaillée des littoraux coralliens des atolls de Maalhosmadulu nord, Maalhosmadulu sud, Kaafu (nord et sud), Addu, dans l'archipel des Maldives et de l'atoll de Funafuti aux Tuvalu, a été réalisée à partir d'observations retraçant plusieurs aspects de leur évolution. La démarche analogique que nous avons adoptée et l'approche naturaliste que nous avons donnée à ce mémoire, ont été des outils précieux dans la compréhension du système complexe qu'est le littoral atollien.

Malgré d'incontestables lacunes, cette étude permet de mieux appréhender l'évolution des archipels maldivien et tuvaluan même si, dans le cas des Tuvalu, les analyses morphologiques qui ont été effectuées n'ont pas été à la mesure de nos espérances.

Partant du postulat d'une remontée du niveau de la mer, nous devons mettre en évidence les modifications insulaires et récifales apparaissant dans les deux archipels. Nous souhaitons ainsi observer les réactions adaptatives du milieu face à d'éventuels changements de ses conditions environnementales. Cette approche par questionnements permettait d'appréhender objectivement le comportement des îles et des archipels dans une perspective de changements climatiques et eustatiques.

Dans l'état actuel des connaissances paléo-environnementales, il est généralement admis que l'élévation du niveau de la mer, durant la remontée postglaciaire, a connu des accélérations et des ralentissements notoires sans que des morphologies notables soient héritées de cette période. Pourtant, les encoches littorales et les témoins d'érosions subaériennes immergés, identifiés sur plusieurs sites maldiviens, sont des repères privilégiés des *hiatus* intervenus au cours de la remontée. Ces observations confortent l'idée développée par certains chercheurs sur d'autres littoraux mondiaux que des arrêts suffisamment prolongés au cours de la remontée postglaciaire ont pu élaborer des formes remarquables. Le raccordement avec d'autres sites mondiaux conduit à considérer ce comportement non plus à une échelle locale mais globale.

L'occurrence des témoins d'érosion remet en cause d'une part la vitesse de remontée eustatique au cours de la transgression postglaciaire, d'autre part le comportement de l'appareil récifal qui a pu suivre cette évolution, et enfin la rapidité dans l'édification des encoches. De telles interrogations introduisent de nouvelles perspectives de recherche.

Au-delà de l'examen de ces marqueurs immergés, le travail entrepris a permis de reconsidérer l'évolution eustatique du niveau de la mer dans l'archipel des Maldives et des Tuvalu à travers la présence de témoins émergés. Ces marqueurs paléoeustatiques révèlent non seulement la présence d'un haut niveau marin mi-holocène, admis désormais par tous, mais identifie, dans le cas des

Maldives, un haut niveau marin tardi-holocène de + 0,50/+ 0,60 m entre 1000 – 800 BP. Ainsi, les îles, les récifs et les hommes auraient déjà dû faire face à une élévation importante du niveau moyen de la mer, ce qui permettrait d'envisager des réactions positives à une éventuelle élévation du niveau actuel.

Le manque de datations permettant d'authentifier les observations réalisées au cours de nos missions fait cruellement défaut à cette étude : alors que le travail en équipe a démontré ses nombreux avantages, il entraîne aussi une relation de dépendance vis-à-vis de l'avancement et de la confidentialité des autres recherches.

Le comportement des îles et des récifs a été analysé à partir de divers documents et cela à des échelles d'analyses variées. Si les îles sont, par essence, des accumulations de sédiments libres dépendantes des conditions marégraphiques, anémométriques ou océaniques, nous pouvions être plus interrogative sur le comportement des récifs coralliens contemporains. Mis en place, dans leur position actuelle, vers 9 000 – 8 000 BP, les récifs coralliens s'orientent suivant les grandes directions contemporaines des vents. Cela signifie soit qu'ils sont capables de s'adapter rapidement aux modifications du climat, soit que les conditions extérieures ont peu évolué depuis leur naissance. Les analyses morphométriques menées sur les récifs porteurs d'îles des atolls maldiviens montrent, en effet, une orientation est-sud-est – ouest-nord-ouest et sud-est - nord-ouest.

L'évolution littorale des systèmes insulaires à tous les niveaux scalaires, qui nourrit notre réflexion sur les réactions adaptatives du milieu à une éventuelle élévation du niveau marin, nous a amenée à définir les conditions environnementales de naissance et de fonctionnement des îles, sachant que les îles de petite taille sont morphologiquement les plus vulnérables. Ce travail mené à partir de différentes accumulations sédimentaires maldiviennes, et tuvaluanes quoique nos observations aient été dans ce dernier cas limitées à l'atoll de Funafuti, montre divers comportements, de la stabilité à l'érosion, sans mettre toutefois en évidence des modifications notoires liées à des conditions hydrodynamiques paroxysmales. Certes, les îles s'érodent, notamment comme le révèle la présence accrue de dalles de beach rock, mais cette évolution régressive paraît être causée par une raréfaction des sédiments alimentant la côte au détriment du platier et/ou du lagon, et/ou encore par des aménagements anthropiques, ou une bio-sédimentogenèse peu abondante par nature.

Dans le cas des observations menées sur le court terme, les mesures confirment une certaine stabilité topographique à l'échelle des îles, mais deux années de suivi s'accommodent assez mal des délais nécessaires à l'évolution et à l'alimentation de ce type de côte.

Les résultats obtenus à partir des travaux menés sur l'évolution des îles sont loin de nos ambitions. Les apports sédimentaires à la côte n'ont pu être quantifiés, les éléments collectés n'ont pu être encore analysés et datés, l'observation des courants instantanés au sein des platiers lors de nos levés à l'aide de traceur comme la fluorescéine s'est révélée inefficace...

S'interroger sur le climat et le niveau marin de demain nécessite de comprendre les éléments contemporains. Dans l'état actuel des connaissances, aucune observation ne permet de considérer une tendance générale plutôt qu'une autre. Certes, à partir d'une légère baisse des précipitations, d'une infime oscillation des températures, d'une faible diminution de l'intensité des vents, d'une certaine stabilité du niveau marin. Peut-on en dégager des tendances ?

L'interprétation de l'évolution des systèmes insulaires et des facteurs qui la commandent nous impose la plus grande prudence en raison de l'insuffisante représentativité spatiale et temporelle des données utilisées. Si l'érosion des côtes pouvait être antérieure à l'établissement de l'homme, ce dernier semble l'avoir largement accentuée.

Cela fait plus d'une décennie que les micro-Etats insulaires vivent dans la certitude que les gaz à effet de serre additionnel, modifiant le climat mondial, vont être responsables de leur disparition. Ainsi, des aménagements lourds ont parfois été réalisés dans le cadre d'une politique préventive du « global warming », mais certains ont servi, en réalité, à la construction de polders. Comme les insulaires ne se satisfont plus de leurs îles originelles, trop exiguës, ils repoussent leurs limites, dans certains cas au plus proche du récif, prêts à modifier toutes les conditions hydrodynamiques qui assuraient jusque là leur équilibre. Dans de nombreux cas, la construction de murs visant à enrayer le recul du rivage est synonyme de réductions considérables de l'alimentation des rivages en sédiments sableux. Quant à la passivité face aux modifications climatiques, elle ne concerne que certains archipels, comme les Tuvalu, où le manque de moyens ne permet pas de bétonner plus en avant le littoral.

Nous aurions souhaité, pour mesurer l'impact réel des extractions coralliennes, effectuer le suivi d'une île excavée. Malheureusement, les îles locales maldiviennes sont interdites aux étrangers et les prélèvements de matériaux coralliens sont théoriquement prohibés. L'utilisation grandissante de ces matériaux coralliens résulte de l'absence d'une réglementation étatique cohérente, régulant leur utilisation. Les mesures appliquées dans la gestion du littoral sont obsolètes, car elles ne prennent pas en compte l'évolution anthropique des îles. Ainsi, les projets gouvernementaux de développement font peser un poids supplémentaire sur le milieu par une absence d'esprit prospectif et une approche superficielle des problèmes d'environnement. Aux travers des politiques auxquelles ils sont associés, il apparaît que les insulaires maldiviens et tuvaluans n'ont pas encore atteint la maturité indispensable pour conduire une approche respectueuse et raisonnée de la nature et de son utilisation.

L'accroissement de la population sur ces territoires exigus implique non seulement une amplification de la demande en matériaux coralliens, mais à des conséquences néfastes liées à la production de déchets, à la dispersion des polluants, à l'abondance des eaux usées.

Ainsi, au-delà des modifications purement morphologiques des systèmes insulaires, qui semblent pour l'heure assurer leur propre équilibre, s'inscrivent de nouvelles perturbations qui apparaissent plus

dommageables pour le milieu, notamment dans la perspective de changements climatiques. En effet, la préservation de ces archipels passe obligatoirement par une pression réduite sur les récifs.

S'inspirant des politiques côtières menées sur les littoraux de pays développés, nous espérons la mise en place d'une réflexion infléchie en un sens plus gestionnaire dans les années à venir, afin d'éviter les « transgressions » constantes du système.

Ainsi, dans la perspective d'un impact anthropique indirect lié à la multiplication des gaz à effet de serre additionnel, ce travail a permis de reconsidérer la place et le rôle des insulaires, au contact quotidien avec leur milieu, dans l'évolution des littoraux. S'il s'avère que les gaz pré-cités peuvent être responsables de modifications dans l'avenir, l'homme est actuellement un agent morphogène important pour les archipels. L'analyse que nous avons menée sur les politiques étatiques de développement a permis de mieux évaluer la portée de ses interventions.

Malgré les incertitudes, et les nombreuses hésitations, cette étude permet d'envisager des perspectives de recherches futures sur les relations entre l'Homme et la Nature.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aalbersberg B., Hay J. (1991) - *Implications of climate change and sea level rise for Tuvalu*. South Pacific Regional Environment Programme, Apia, 80 p.
- Adey W.H., McIntyre I.G., Stuckenrath R., Dill R. (1977) - Relict Barrier reef system off St Croix : its implication with respect to late cenozoic coral reef development in the Western Atlantic. *Third International Coral Reef Symposium*, Miami, vol. 2, pp. 15-21.
- Admiralty survey (1992a) - *Maldives - Addoo atoll to north Huvadho atoll (Sheet 1)*. 1:300000, Admiralty publications, Taunton.
- Admiralty survey (1992b) - *Maldives - Mulaku atoll to south Maalhosmadulu atoll (Sheet 3)*. 1:300000, Admiralty publications, Taunton.
- Admiralty survey (1992c) - *Maldives - North Huvadho atoll to Mulaku atoll (Sheet 2)*. 1:300000, Admiralty Publications, Taunton.
- Admiralty survey (1992d) - *Maldives - South Maalhosmadulu atoll to Ihavandhippolhu atoll (Sheet 4)*. 1:30000, Admiralty publications, Taunton - UK.
- Ali M. (1991) - *Characterisation of biogenic marine sands used in construction in the Maldives, with particular attention to their suitability in the manufacture of hollow concrete blocks for building*. University of Newcastle upon Tyne Centre for Tropical Coastal Management Studies, 93 p.
- Ali M. (2000) - *Reef island geomorphology : formation, development, and perspectives of islands in Eta atoll, South Maalhosmadulu, the Maldives*. Geography and Oceanography PhD Thesis, New South Wales, 296 p.
- Ali M., Maniku M.H. (1989) - Sea level rise : a coral atoll perspective. *Proceedings of the Small States Conference on Sea Level Rise*, Malé, 14-18 November, 13 p.
- Allen L. (2004) - Le réchauffement n'engloutira pas les îles Tuvalu, mais ... *Courrier International*, n° 726, 56 p.
- Allison W.R. (1996) - Snorkeler damage to reef corals in the Maldive Islands. *Coral Reefs*, vol. 15, pp. 215-218.
- Amsler K. (1995) - Maldives, guide du plongeur. n° Hassan K., N.D. Azeez.
- Anderson D.L. (1998) - The scales of mantle convection. *Tectonophysics*, vol. 284, n° 1-2, pp. 1-17.
- Anderson D.L. (2000) - The thermal state of the upper mantle ; no role for mantle plumes. *Geophysical research letters*, vol. 27, n° 22, pp. 3623-3626.
- Anderson R. C. (1998) - Submarine topography of Maldivian atolls suggests a sea level of 130 metres below present at the last glacial maximum. *Coral reefs*, vol. 17, pp. 339-341.
- Anonyme (1987) - *The fire caves of Nanumaga*. <http://www.tuvaluaislands.com>, Document Internet, accédé en 2003.
- Anonyme (1989) - Malé declaration on global warming and sea level rise. *Proceedings of the Small States Conference on Sea Level Rise*, Malé, 14-18 November 1989, 7 p.
- Anonyme (1996) - Rien ne va plus dans le Pacifique. *La Recherche*, vol. 283, 16 p.
- Anonyme (1997) - Global Warming could sink the islands of Maldives. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 34, n° 6, 364 p.
- Arlington V.A. (2000) - Coral reef facts. *Nature conservancy*,
- Asian Development Bank (1998) - *Environmental Management of the Republic of Maldives. An Overview*. Asian Development Bank, 65 p.

Aubert O. (1994) - *Origin and stratigraphic evolution of the Maldives (Central Indian Ocean)*. Geology and Geophysics PhD Thesis, Rice University, Houston, 234 p.

Aubert O., Droxler A.W. (1992) - General cenozoic evolution of the Maldives carbonate system (Equatorial Indian ocean). *Elf aquitaine production*, vol. 16, pp. 113-136.

Aubert O., Droxler A.W. (1996) - Seismic stratigraphy and depositional signatures of the Maldivian carbonate system (Indian ocean). *Marine and petroleum geology*, vol. 13, pp. 503-536.

Avraham Z.B., Bunce E.T. (1977) - Geophysical study of the Chagos-Laccadive ridge, Indian ocean. *Journal of Geophysical research*, vol. 82, n° 8, pp. 1295-1305.

Baines G.B.K., Beveridge P.J., Maragos J.E. (1974) - Storms and island building at Funafuti atoll, Ellice islands. *Proceedings of the Second International Coral Reef Symposium*, Brisbane, vol. 2.

Baines G.B.K., McLean R.F. (1976) - Re-surveys of 1972 hurricane rampart of Funafuti atoll, Ellice islands. *Search*, vol. 7, pp. 36-37.

Bard E., Hamelin B., Arnold M., Montaggioni L., Cabioch G., Faure G., Rougerie F. (1996) - Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature*, vol. 382, pp. 241-244.

Bard E., Hamelin B., R.G., Fairbanks (1990) - U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados : sea level during the past 130,000 years. *Nature*, vol. 346, pp. 456-458.

Bardintzeff J-M. (1998) - *Volcanologie*. Dunod, 284 p.

Barstow S.F., Patiale M. (1992) - *An appraisal of the visual wave observations at Funafuti. 1984-1992*. SOPAC, Technical Report n° 147, Suva, 20 p.

Battistini R. (1977) - Un atoll à morphologie énigmatique : Farquhar (Seychelles). *Bull. Assoc. Géogr. Fr.*, vol. 444, pp. 195-204.

Battistini R., Bourrouilh - Le Jan F.G., Chevalier J-P., Coudray J., Denizot M., Faure G., Fisher J-C., Guilcher A. (1975) - Eléments de terminologie récifale indopacifique. *Téthys*, vol. 7, 111 p.

Battistini R., Jouannic C. (1979) - Recherches sur la géomorphologie de l'atoll Farquhar (archipel des Seychelles). *Atoll Research Bulletin*, n° 230, pp. 1-44.

Bayliss-Smith T. (1988) - The role of hurricanes in the development of reef islands, Ontong Java atoll, Solomon islands. *Geographical Journal*, vol. 154, pp. 377-391.

Belopolsky A.V. (2000) - *Tectonic and eustatic controls on the evolution of the Maldivian carbonate platform*. de Geology and Geophysics, Rice University, Houston, 267 p.

Belopolsky A.V., Droxler A.W. (2002) - Seismic expressions of prograding carbonate bank margins : middle Miocene progradation in the Maldives, Indian Ocean. *Sous presse*.

Bessat F. (1997) - *Variabilité hydro-climatique et croissance corallienne en Polynésie Française : exemples de l'île de Moorea et de l'atoll de Mururoa*. Doctorat Nouveau Régime de Géographie, Paris I - Panthéon-Sorbonne, 293 p.

Blanchet G. (1997) - L'aide au développement dans le Pacifique insulaire : réflexion en forme de bilan. *Revue Tiers-Monde*, vol. 149, pp. 57-78.

Blanchon P., Jones B., Ford D.C. (2002) - Discovery of a submerged relic reef and shoreline off Grand Cayman : further support for an early Holocene jump in sea level. *Sedimentary Geology*, vol. 147, pp. 253-270.

Blanchon P., Shaw J. (1995) - Reef drowning during the last deglaciation : evidence for catastrophic sea-level rise and ice sheet collapse. *Geology*, vol. 23, n° 1, pp. 4-8.

- Bonem R.M. (1988) - Effects of submarine karst development on reef succession. *Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium*, Townsville, Barnes D. Choat J.H., Borowitzka M.A., Coll J.C., Davies P.J., Flood P., Hatcher B.G., Hopley D., Hutchings P.A., Kinsey D., Orme G.R., Pichon M., Sale P.F., Sammarco P., Wallace C.C., Wilkinson C., Wolanski E., Bellwood O. (ed.), Sixth International Coral Reef Symposium Executive Committee, vol. 3, pp. 419-423.
- Bonnet N. (1998) - L'archéologie aide les climatologues dans leur étude du phénomène El Nino. *Le Monde*.
- Bonneville A. (2002) - *The Cook-Austral volcanic chain*. <http://www.mantleplumes.org/>, Document Internet, accédé en 2004.
- Bonneville A., Barriot J-P., Bayer R. (1988) - Evidence from geoid data of a hotspot origin for the southern Mascarene Plateau and Mascarene Islands. *Journal of Geophysical research*, vol. 93, pp. 4199-4212.
- Bourrouilh - Le Jan F.G. (1990) - *Diagenèse des carbonates de plates-formes. Récifs et mangroves, en Atlantique et Pacifique*. Thèse de Doctorat d'Etat de Géologie, Pierre et Marie Curie - Paris VI, Paris, 190 p.
- Bourrouilh - Le Jan F.G. (1992a) - Les récifs coralliens : indicateurs de l'environnement et des paléoenvironnements. In: Maire R. Salomon J.- N. (coord) - *Karts et évolutions climatiques*, Presses Universitaires de Bordeaux, pp. 275-297.
- Bourrouilh - Le Jan F.G. (1992b) - Naissance géologique d'un karst. Lithification-dissolution des sédiments marins de 125 ka à l'actuel et ses conséquences. In: Maire R. Salomon J.-N. (coord) - *Karst et évolutions climatiques*, Presses Universitaires de Bordeaux, pp. 77-101.
- Bourrouilh - Le Jan F.G., Talandier J. (1985) - Sédimentation et fracturation de haute énergie en milieu récifal : tsunamis, ouragans et cyclones et leurs effets sur la sédimentologie et la géomorphologie d'un atoll : motu et hoa, à Rangiroa, Tuamotu, Pacifique SE. *Marine Geology*, vol. 67, pp. 263-333.
- Brigand L. (2000) - *Iles, îlots et archipels du Ponant. De l'abandon à la surfréquentation ? Essai sur la question des usages, de la gestion et de la conservation depuis 1950*. Thèse d'Etat de Géographie, Paris I Sorbonne, 469 p.
- Brocher T.M. (1985) - On the age progression of the seamounts west of the Samoan islands, SW Pacific. In: Brocher T.M. (coord) - *Geological investigations of the northern Melanesian borderland*, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences, vol. 3, Houston, pp. 173-185.
- Brown B.E. (1989) - Possible effects of sea level rise on corals and reef growth. *Proceedings of the Small States Conference on Sea Level Rise*, Malé, 14-18 November, 17 p.
- Brown B.E. (1997) - Coral bleaching : causes and consequences. *Coral Reefs*, vol. 16, pp. S129-S138.
- Brown B.E., Dawson-Shepherd A.R., Weir I., Edwards A.J. (1990) - *Effects of degradation of the environment on local reef fisheries in the Maldives*. Overseas Development Administration, 14 p.
- Brown B.E., Dunne R. P. (1988) - The environmental impact of coral mining on coral reefs in the Maldives. *Environmental conservation*, vol. 15, pp. 159-166.
- Buckley R.C. (1985) - Environmental survey of Funafuti atoll (Tuvalu). Actes du Colloque *Fifth International Coral Reef Congress*, Tahiti, 27 Mai-1 Juin, Antenne Museum-EPHE, vol. 6, pp. 305-310.
- Buddemeier R. W., Gattuso J-P. (2000) - Mauvais air pour les récifs coralliens. Le dioxyde de carbone inhibe la calcification des coraux. *La Recherche*, vol. 334, pp. 52-56.
- Buddemeier R. W., Hopley D. (1988) - Turn-ons and turn-offs : causes and mechanisms of the initiation and termination of coral reef growth. *Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium*, Townsville, Barnes D. Choat J.H., Borowitzka M.A., Coll J.C., Davies P.J., Flood P., Hatcher B.G., Hopley D., Hutchings P.A., Kinsey D., Orme G.R., Pichon M., Sale P.F., Sammarco P., Wallace C.C., Wilkinson C., Wolanski E., Bellwood O. (ed.), Sixth International Coral Reef Symposium Executive Committee, p. 253-261.

- Buigues D. (1996) - Mururoa and Fangataufa : sea-level changes, karstification and the atoll morphology. *Mém. Soc. géol. France*, vol. Special 169, pp. 373-382.
- Byrne G. (1991) - Sediment movement on Tarawa : Kiribati. *Proceedings of the Workshop on Coastal Processes in the South Pacific Island Nations*, Lae, SOPAC (ed.), n° 7, Technical Bulletin.
- C.W., Fetter (1972) - Position of the saline water interface beneath Oceanic islands. *Water Resources Research*, vol. 8, n° 5, pp. 1307-1315.
- Cabioch G. (1988) - *Récifs frangeants de Nouvelle-Calédonie (Pacifique Sud-Ouest). Structure interne et influences de l'eustatisme et de la néotectonique*. Université de Provence, ORSTOM.
- Cabioch G., Camoin G., Montaggioni L. (1999) - Postglacial growth history of French Polynesian barrier reef (Tahiti, central Pacific). *Sedimentology*, vol. 46, pp. 985-1000.
- Camoin G.F., Colonna M., Montaggioni L.F., Casanova J., Faure G., Thomassin B.A. (1997) - Holocene sea level changes and reef development in the southwestern Indian Ocean. *Coral reefs*, vol. 16, pp. 247 - 259.
- Camoin G.F., Ebren P., Eisenhauer A., Bard E., Faure G. (2001) - A 300 000-yr coral reef record of sea level changes, Mururoa atoll (Tuamotu archipelago, French Polynsea). *Palaeogeography , Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 175, pp. 325-341.
- Camoin G.F., Montaggioni L.F., Braithwaite C.J.R. (2004) - Late glacial to post glacial sea levels in the Western Indian Ocean. *Marine Geology*, vol. 206, pp. 119-146.
- Camoin G.F., Montaggioni L.F. (1995) - Coraux fossiles, archives du climat. *La Recherche*, vol. 26, pp. 402-407.
- Cazenave A. (1999) - Les variations actuelles du niveau moyen de la mer. *C. R. Acad. Sc.*, vol. Sciences de la terre et des planètes, n° 329, pp. 457-469.
- Cazes-Duvat V. (2001) - Le poids des contraintes physiques dans le développement des atolls : l'exemple de l'archipel des Maldives (océan Indien). *Janvier-Mars, Les cahiers d'outre-mer*, vol. 213, pp. 3-26.
- Cazes-Duvat V., Magnan A. (2004) - Les îles-hôtels, terrain d'application privilégié des préceptes du développement durable : l'exemple des Seychelles et des Maldives (océan Indien). *Cahiers d'Outre-Mer*, vol. 57, n° 225, pp. 75-100.
- Chew R.T. (1999) - Environmental problems on the low atolls of the Marshall islands. *Journal of geoscience education*, vol. 47, pp. 143-149.
- Ciarapica G., Passeri L. (1993) - An overview of the maldivian coral reefs in Felidu and North Malé atoll (Indian ocean) : platform drowning by ecological crises. *Facies*, vol. 28, pp. 33-66.
- Clark S., Akester S., Naaem H. (1999) - *The status of coral reef communities in North Malé Atoll, Maldives : recovery following a severe bleaching event in 1998*. Environment Department, Draft report, 12 p.
- Clark S., Edwards A. J. (1994) - Use of artificial reef structures to rehabilitate reef flats degraded by coral mining in the Maldives. *Bulletin of marine science*, vol. 55, pp. 724-744.
- Clark S., Edwards A. J. (1999) - An evaluation of artificial reef structures as tools for marine habitat rehabilitation in the Maldives. *Aquatic conservation : Marine and Freshwater ecosystems*, vol. 9, pp. 5-21.
- Clark S., Edwards A.J. (1995) - Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation : evaluation of a case study in the maldives Islands. *Coral reefs*, vol. 14, pp. 201-213.
- Cloud P.E. (1952) - Preliminary report on the geology and marine environments of Onotoa Atoll, Gilbert Islands. *Atoll Research Bulletin*, vol. 12, pp. 1-32.
- Collectif (1983) - El niño of 1982-1983. *EOS*, vol. 64, pp. 719-720.

- Collina-Girard J. (1998) - Paliers bathymétriques observés en plongée sur le littoral occidental de la Corse. Conséquences néotectoniques. *C.R. Acad.Sci., Sciences de la Terre et des Planètes*, vol. 327, pp. 121-126.
- Collina-Girard J. (1999) - Observation en plongée de replats d'érosion eustatique à l'île d'Elbe (Italie) et à Marie-Galante (Antilles) : une séquence bathymétrique mondiale? *C.R. Acad Sci., Sciences de la Terre et des Planètes*, vol. 328, pp. 823-829.
- Collina-Girard J. (2000) - Les paléolagons submergés de l'île de Marie-Galante (Antilles). *C.R. Acad. Sci., Sciences de la Terre et des Planètes*, vol. 331, pp. 367-372.
- Collina-Girard J. (2002) - Underwater mapping of Late Quaternary submerged shorelines in the Western Mediterranean Sea and the Caribbean Sea. *Quaternary International* 92, pp. 63-72.
- Colonna M. (1996) - Reconstitution des variations du niveau marin au cours de l'Holocène dans la partie sud-occidentale de l'Océan Indien. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, n° II a, pp. 653-660.
- Colonna M., Casanova J., Dullo W-CH., Camoin G. (1996) - Sea-level changes and d18O record for the past 34,000 yr from Mayotte reef, Indian ocean. *Quaternary research*, vol. 46, pp. 335-339.
- Commission of the European Communities (1995) - *Maldives, Tourism master plan 1996-2005*, 42 p.
- Corrège T., Delcroix T., Récy J., Beck W., Cabioch G., Le Cornec F. (2000) - Evidence for stronger El Nino-Southern Oscillation (ENSO) events in a mid-Holocene massive coral. *Paleoceanography*, vol. 15, n° 4, pp. 465-470.
- Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. (2003) - Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 205, pp. 295-308.
- Dahl A.L., Salvat B. (1988) - Are human impacts, either through traditional or contemporary uses, stabilizing or destabilizing to reef community structure ? *Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium*, Townsville, Barnes D. Choat J.H., Borowitzka M.A., Coll J.C., Davies P.J., Flood P., Hatcher B.G., Hopley D., Hutchings P.A., Kinsey D., Orme G.R., Pichon M., Sale P.F., Sammarco P., Wallace C.C., Wilkinson C., Wolanski E., Bellwood O. (ed.), Sixth International Coral Reef Symposium Executive Committee, vol. 1, n° 3, pp. 63-69.
- Dalongeville R., Sanlaville P. (1983) - Essai de synthèse sur le beach-rock. Actes du Colloque *Le Beach-Rock*, Lyon, Maison de l'Orient Méditerranéen (ed.), GIS - Maison de l'Orient, vol. 8, pp. 161-167.
- Dalongeville R. (2001) - Arguments en faveur de la prise en compte de la cimentation des beach-rocks. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 4, pp. 296-298.
- Darwin C. (1962) - Coral Islands. *Atoll research bulletin*, vol. 88, pp. 1-20.
- Deda P. (1999) - Sustainable tourism in small island developing country. *Insula*, vol. 8, pp. 40-44.
- Demas (1987) - *Borrow pits , Tuvalu*. U.N.D.P., 21 p.
- DePaolo D.J., Manga M. (2003) - Deep origin of Hotspots - the Mantle Plume model. *Science*, vol. 300, pp. 920-921.
- Detrick R.S., Sclater J.G., Thiede J. (1977) - The subsidence of aseismic ridges. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 34, n° 2, pp. 185-196.
- Dickinson W.R. (1998) - Geomorphology and Geodynamics of the Cook - Austral Island-Seamount chain in the South Pacific Ocean : Implications for hotspots and plumes. *International Geology review*, vol. 40, pp. 1039-1075.
- Dickinson W.R. (1999) - Holocene sea-level record on Funafuti and potential impact of global warming on Central Pacific atolls. *Quaternary research*, vol. 51, pp. 124-132.

- Dickinson W.R. (2003) - Impact of mid-Holocene hydro-isostatic highstand in regional sea level on habitability of islands in Pacific Oceania. *Journal of Coastal Research*, vol. 19, n° 3, pp. 489-502.
- Dickinson W.R. (2004) - Impacts of eustasy and hydro-isostasy on the evolution and landforms of Pacific atolls. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. sous presse, 19 p.
- Dickinson W.R., Burley D.V., Shutler R.J. (1999) - Holocene paleoshoreline record in Tonga : geomorphic features and archaeological implications. *Journal of Coastal Research*, vol. 15, pp. 682-700.
- DiVenere V., Kent D.V. (1999) - Are the Pacific and Indo-Atlantic hotspots fixed ? Testing the plate circuit through Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 170, pp. 105-117.
- Domroes M. (1993) - Maldivian tourist resorts and their environmental impact. In: P. P. Wong (coord) - *Tourism VS Environment : The case for coastal areas*, Kluwer Academic Publishers, pp. 69-82.
- Domroes M. (1999) - Tourism in the Maldives : the resort concept and tourist-related services. *Insula*, vol. 3, n° November, pp. 7-14.
- Domroes M. (2001) - Conceptualising state-controlled resort islands for an environment-friendly development of tourism : the maldivian experience. *Singapore Journal of Tropical Geography*, vol. 22, n° 2, pp. 122-137.
- Domroes M., Brock K.J., Mertel P.M. (1995) - *Ecological and environmental protection of Maldivian tourist resorts*. Johannes Gutenberg - University Mainz, 55 p.
- Doumenge F. (1966) - *L'Homme dans le Pacifique Sud : étude géographique*. Publications de la Société des Océanistes, Musée de l'Homme, vol. 19, Paris, 633 p.
- Doumenge F. (1985) - Les îles et les micro-Etats insulaires. *Hérodote*, vol. 37-38, pp. 297-327.
- Doumenge J-P. (1984) - Contrôle de l'espace et utilisation du sol en Océanie insulaire. In: CEGET-CRET (coord.) - *Nature et Hommes dans les îles tropicales : réflexions et exemples*, vol. 3, pp. 135-140.
- Droxler A.W., Haddad G.A., Mucciarone D.A., Cullen J.L. (1990) - Pliocene-Pleistocene aragonite cyclic variations in holes 714A and 716B (The Maldives) compared with hole 633A (The Bahamas) : records of climate-induced CaCO₃ preservation at intermediate water depths. (coord) - *Proceedings of the Ocean Drilling Program - Scientific Results*, vol. 115, pp. 539-577.
- Duncan R.A. (1985) - Radiometric ages from volcanic rocks along the New Hebrides - Samoa lineament. In: Brocher T.M. (coord) - *Geological investigations of the Northern Melanesian Borderland*, Circum-Pacific council for Energy and Mineral Resources, Earth Science, vol. 3, Houston, pp. 67-76.
- Dupuis J. (1974) - Les maldives. *Les cahiers d'outre mer*, vol. 27, pp. 5-21.
- Edwards A., Clark S., Zahir H., Rajasuriya A., Naseer A., Rubens J. (2001) - Coral bleaching and mortality on artificial and natural reefs in Maldives in 1998, sea surface temperature anomalies and initial recovery. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 42, n° 1, pp. 7-15.
- Edwards A. J. (1989) - *The implications of sea-level rise for the Republic of Maldives*. Commonwealth Expert Group on Climate Change and Sea Level Rise Centre for Tropical Coastal Management Studies, 68 p.
- Falkland A.C. (1992) - *Small tropical islands*. UNESCO, Humid Tropics Programme Series n° 2, 48 p.
- Falkland A.C. (1999) - *Water management for Funafuti, Tuvalu*. Australian Agency for International Development, 62 p.
- Fickling D. (2003) - Islanders consider Exodus as sea level rises. *The Guardian*.
- Field M. (1999) - *Little evidence to show Pacific ocean rising due to global warming*. <http://www.afp.com/english>, Document Internet, accédé en 2001.

Field M. (2002) - *Global warming not sinking Tuvalu*. <http://www.afp.com/english>, Document Internet, accédé en 2002.

Flament J., Miossec A., Regrain R., Flament E. - *Les littoraux en France: risques et aménagement. Du risque naturel à l'aménagement et de l'aménagement au risque*. APHG Picardie, 96p.

Foucault A., Raoult J-F. (2001) - *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Masson Sciences, 5ème édition, 379 p.

Foulger G.R., Natland J.H. (2003) - Is "Hotspot" volcanism a consequence of plate tectonics? *Science*, vol. 300, pp. 921-922.

Fretzdorff S., Stoffers P., Devey C.W., Munschy M. (1998) - Structure and morphology of submarine volcanism in the hotspot region around Réunion island, western Indian Ocean. *Marine geology*, vol. 148, pp. 39-53.

Gardiner J.S. (1902) - The formation of the Maldives. *Royal Geographical Society*, vol. 27, pp. 277-301.

Gardiner J.S. (1903) - The origin of Coral Reefs as shown by the Maldives. *American Journal Science*, vol. 16, pp. 203-213.

Gattuso J.-P., Buddemeier R. W. (2002) - Coral reefs : an ecosystem subject to multiple environmental threats. In: Mooney H.A. et Canadell J.G. (coord) - *Encyclopedia of Global Environmental Change*, John Wiley and Sons, vol. 2, Chichester, 9 p.

Gay J-C. (2000) - La mise en tourisme des îles intertropicales. *Mappe Monde*, vol. 2, pp. 17-22.

Gay J-C. (2001) - L'île-hôtel, symbole du tourisme maldivien. *Janvier-Mars Les cahiers d'outre-mer*, vol. 213, pp. 27-52.

Genthon P., Cabioch G., Calmant S., Ormond A. (2001) - Distribution des cavités de l'atoll soulevé de Walpole. Implications sur le processus de karstification par les eaux météoriques. *C.R. Acad Sci. - Sciences de la Terre et des Planètes*, n° 332, pp. 439-445.

Goda Y. (1987) - *Cause of high waves at Malé in April 1987*. Department of Public Works and Labour, Malé.

Godfrey T. (1999) - *Malways, Maldives island directory*. Atoll Editions, 3ème, 39 p.

Goreau T.F. (1961) - On the relation of calcification to primary productivity in reef building organisms. *The biology of hydra*, pp. 269-285.

Goreau T.F., Hartmann W.D. (1963) - Boring sponges as controlling factors in the formation and maintenance of coral reefs. (coord) - *Mechanisms of Hard tissue destruction*, Am. Assoc. for Adv. Sci., vol. 75, Washington D.C., pp. 25-54.

Goreau T.F., Land L.S. (1974) - Fore-reef morphology and depositional processes, North Jamaica. *Soc. Econ. Paleo. Mineral.*, pp. 77-89.

Goreau T.J., Hayes R.L. (1994) - Coral bleaching and ocean "Hot Spots". *Ambio*, vol. 23, n° 3, pp. 176-180.

Goreau T.J., McClanahan T.R., Hayes R., Strong A.E. (2000) - Conservation of coral reefs after the 1998 Global Bleaching event. *Conservation Biology*, vol. 14, n° 1, pp. 5-15.

Gourlay M.R. (1988) - Coral cays : products of wave action and geological processes in a biogenic environment. *Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium*, Townsville, 8-12 Août, Barnes D. Choat J.H., Borowitzka M.A., Coll J.C., Davies P.J., Flood P., Hatcher B.G., Hopley D., Hutchings P.A., Kinsey D., Orme G.R., Pichon M., Sale P.F., Sammarco P., Wallace C.C., Wilkinson C., Wolanski E., Bellwood O. (ed.), Sixth International Coral Reef Symposium Executive Committee, vol. II, n° III, pp. 491-496.

Government of Tuvalu (1978a) - *Laws of Tuvalu : Foreshore and land Reclamation*. 6 p.

Government of Tuvalu (1978b) - *Laws of Tuvalu : Natives lands*. 33 p.

- Government of Tuvalu (1988) - *Tuvalu, National development plan IV, 1988-1991*. Government of Tuvalu, 261 p.
- Government of Tuvalu (1995) - *Kakeega o Tuvalu, National development strategy 1995 to 1998*. Government of Tuvalu, 86 p.
- Government of Tuvalu, Tourism council of the South Pacific (1992) - *Tuvalu tourism development plan 1993-2002*. Government of Tuvalu, 233 p.
- Griffith M.D., Ashe J. (1993) - Sustainable development of coastal and marine areas in small island developing states : a basis for integrated coastal management. *Ocean and coastal management*, vol. 21, pp. 269-284.
- Grossman E.E., Fletcher C.H., Richmond B.M. (1998) - The Holocene sea-level highstand in the equatorial Pacific : analysis of the insular paleosea-level database. *Coral reefs*, vol. 17, pp. 309-327.
- Guébourg J.-L. (1999) - *Petites îles et archipels de l'océan Indien*. Karthala.
- Guilcher A. (1950) - Les récifs coralliens : formes et origines. *L'information géographique*, vol. 5, pp. 183-196.
- Guilcher A. (1952) - Formes de décomposition chimique dans la zone des embruns et des marées sur les côtes britanniques et bretonnes. Actes du Colloque *Cinquantième anniversaire du laboratoire de Géographie (1902-1952)*, Rennes, vol. Volume Jubilaire offert à Mr. E de Martonne, pp. 167-181.
- Guilcher A. (1953) - Problèmes et méthodes de l'étude géomorphologique des récifs coralliens. *Revue de géographie de Lyon*, vol. 28, pp. 174-180.
- Guilcher A. (1954) - *Morphologie littorale et sous-marine*. P.U.F., Orbis, Introduction aux études de Géographie, 216 p.
- Guilcher A. (1956) - Etude géomorphologique des récifs coralliens du Nord-Ouest de Madagascar. *Annales de l'Institut Océanographique*, pp. 65-136.
- Guilcher A. (1961) - Le "beach-rock" ou grès de plage. *Annales de Géographie*, vol. 378, pp. 113-125.
- Guilcher A. (1965) - Coral reefs and lagoons of Mayotte island, Comoro Archipelago, Indian ocean, and of New Caledonia, Pacific ocean. *Proc. 17th Symp. Colston Research Soc.*, Bristol, Whittard W.F. and Bradshaw R. (ed.), pp. 21-45.
- Guilcher A. (1967) - Les îles Gilbert comparées aux Tuamotus. *Journal de la Société des Océanistes*, vol. 23, pp. 101-113.
- Guilcher A. (1979) - Origin of passes across atoll rims and barrier reefs. *Proc. XIVth Pacific Sci. Congr.*, Khabarovsk, 113 p.
- Guilcher A. (1988) - *Coral reef geomorphology*. John Wiley and Sons, E.C.F. Bird, Coastal morphology and research.
- Guilcher A. (1991) - Progress and problems in knowledge of coral lagoon topography and its origin in the South Pacific, by way of pinnacle study. *Society for Sedimentary Geology*, pp. 173-188.
- Guilcher A. (1992) - Relations entre la circulation karstique et la dolomitisation dans la structuration des atolls. In: Salomon J.- N. et Maire R. (coord) - *Karst et évolutions climatiques*, Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux, pp. 105-113.
- Guilcher A., Pont P. (1957) - Etude expérimentale de la corrosion littorale des calcaires. *Bulletin de l'association de géographes français*, vol. 265-266, pp. 48-62.
- Hakeem A.A.A., Hilberz W., Goreau T.F. (2004) - Adieu, les Maldives. *Courrier International*, n° 714, pp. 36-37.

- Hieronymus C.F., Bercovici D. (1999) - Discrete alternating hotspot islands formed by interaction of magma transport and lithospheric flexure. *Nature*, vol. 397, pp. 604-607.
- Hinde G.J. (1904) - Report on the materials from the borings at the Funafuti atoll. In: Royal Society (coord) - *The atoll of Funafuti*, vol. Section X-i.
- Hoegh-Guldberg O. (1999) - *Climate change coral bleaching and the future of the world's coral reefs*. Greenpeace, 27 p.
- Hoffmeister J.E., Ladd H.S. (1944) - The antecedent-platform theory. *J. Geol.*, vol. 52, pp. 388-502.
- Hoffmeister J.E., Ladd H.S. (1945) - Solution effects on elevated limestone terraces. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 56, pp. 809-818.
- Holthus P. (1990) - Les aménagements littoraux et les modifications des lignes de rivage : leurs conséquences sur l'environnement des récifs et des lagons. Actes du Colloque *Proceedings ISRS Congress*, Nouméa, vol. 2.
- Hopley D. (1982) - *The Geomorphology of the Great Barrier Reef : Quaternary Development of Coral Reefs*. John Wiley and sons, 453 p.
- Hopley D. (1986) - Corals and reefs as indicators of plaeo-sea levels, with special reference to the Great Barrier Reef. In: van de Plassche O. (coord) - *Sea-level research : a manual for the collection and evaluation of data*, Geo Books, pp. 195-228.
- Hopley D. (1994) - Coral reefs islands in a period of global sea level rise. In: J.L. Munro et P.E. Munro (coord) - *The management of coral reef resource systems*, ICLARM, pp. 41-48.
- Howorth R. (1985) - *Report on visit to Funafuti, Tuvalu. June 24 - July 1, 1985 : Including resurvey of beach profiles on lagoon side of Fongafale*. SOPAC, Technical Report n° 68, Suva, 35 p.
- Howorth R. (1986) - *Report on visit to Funafuti, Tuvalu. May 19-23, 1986 to resurvey beach profiles on lagoon side of Fongafale*. SOPAC, Technical report n° 69, Suva.
- Howorth R., Radke B. (1987) - Investigation of historical shoreline changes : Betio, Tarawa atoll, Kiribati and Fongafale, Funafuti atoll, Tuvalu. *Proceedings of the Workshop on coastal processes in the South Pacific Islands Nations*, Lae, n° 7, Technical Bulletin.
- Howorth R., Woodward P. (1994) - *Tuvalu in-country seminar on beach monitoring. 24-28 January 1994*. SOPAC, Training Report n° 62, Suva, 40 p.
- I.N.Q.U.A. (2000) - *Sea level changes, News and views, The Maldives Project*. www.pog.su.se/sea, Document Internet.
- Imperiali F. (2004) - Evolution du climat. Peut-on se fier aux modèles ? *Le journal du CNRS*, n° 172, pp. 18-23.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2001) - *Climate change 2001, Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, WMO - UNEP, 1032 p.
- Israelson C., Wohlfarth B. (1999) - Timing of the last-Interglacial high sea level on the Seychelles Islands, Indian Ocean. *Quaternary research*, vol. 51, pp. 306-316.
- Japan International Cooperation Agency (1999) - *The study on solid waste management for Male city in the Republic of Maldives*. n° 37, 52 p.
- Joly F. (1997) - *Glossaire de Géomorphologie. Base de données sémiologiques pour la cartographie*. Masson/Armand Colin, Paris.
- Kaly U.L. (1998) - *Environmentally-friendly beach ramps "Enviroramps" for the Tuvalu outer islands*. Government of Tuvalu, Technical papers (Environment) n° 3, Fongafale, 9 p.

- Kaly U.L. (1999) - *Dealing with the borrow pits on Funafuti, Tuvalu*. Government of Tuvalu, Technical papers (Environment) n° 7, Fongafale, 8 p.
- Kaly U.L., Jones G.P. (1994) - Long-term effects of blasted boat passages on intertidal organisms in Tuvalu : a meso-scale human disturbance. *Bulletin of Marine Science*, vol. 54, pp. 164-179.
- Katupotha J., Fujiwara K. (1988) - Holocene sea level change on the southwest and south coasts of Sri Lanka. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, vol. 68, pp. 189-203.
- Kempf M., Laborel J. (1968) - Formations de Vermets et d'Algues calcaires sur les côtes du Brésil. *Rec. Trav. Stat. Marine Endoume*, vol. 43, n° 59, pp. 9-23.
- Khan T.M.A., Quadir D.A., Murty T.S., Kabir A., Aktar F., Sarker M.A. (2002) - Relative sea level changes in Maldives and vulnerability of land due to abnormal coastal inundation. *Marine Geodesy*, vol. 25, pp. 133-143.
- Laborel J. (1967) - *Les peuplements de Madréporaires des côtes tropicales du Brésil*. Thèse de Sciences Naturelles, Aix-Marseille, 313 p.
- Laborel J. (1978a) - Les gastéropodes Vermetidés. Leur utilisation comme marqueurs biologiques de rivages fossiles. Actes du Colloque NIVMER - "Les indicateurs de niveaux marins", Paris, 2 Décembre 1978, vol. 3.
- Laborel J. (1978b) - Utilisation des Cnidaire Hermatypiques comme indicateurs de niveau. Actes du Colloque NIVMER - "Les indicateurs de niveaux marins", Paris, 2 Décembre 1978, vol. 3.
- Laborel J. (1986) - Vermetid gastropods as sea-level indicators. In: van de Plassche O. (coord) - *Sea-level research : a manual for the collection and evaluation of data*, Geo Books, pp. 281-310.
- Laborel J., Morhange C., Collina-Girard J., Laborel-Deguen F. (1999) - Littoral bio-erosion, a tool for the study of sea-level variations during the Holocene. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, vol. 45, pp. 164-168.
- Lawrence R.J. (1985) - The transformation of traditional agriculture in the atolls of Kiribati. *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, Tahiti, 27 Mai-1 Juin, Antenne Muséum-EPHE, vol. 6, p. 595-600.
- Lenhardt X. (1991) - *Hydrodynamique des lagons d'atoll et d'île haute en Polynésie Française*. ORSTOM, Etudes et thèses.
- Leroux M. (2000) - *La dynamique du temps et du climat*. Masson, Enseignement des Sciences de la Terre, Paris, Seconde Edition, 367 p.
- Lewis J. (1989) - Vulnerability of small states to sea level rises : sea-defence, adjustment, and preparedness; requirements for holistic national and international strategies. Actes du Colloque *Small states conference on sea level rise*, Malé, 14-18 November.
- Lewis J.B. (2002) - Evidence from aerial photography of structural loss of coral reefs at Barbados, West Indies. *Coral Reefs*, vol. 21, pp. 49-56.
- Loch K., Loch W., Schuhmacher H., See W.R. (2002) - Coral recruitment and regeneration on a Maldivian reef 21 months after the coral bleaching event of 1998. *Marine ecology*, vol. 23, n° 3, pp. 219-236.
- Loper D.E. (1997) - Mantle plumes and their effects on the Earth's surface : a review and synthesis. *Dynamics of atmospheres and Oceans*, vol. 27, n° 1-4, pp. 35-54.
- MacAlister Elliott et Partners Ltd. (2001) - *Environment assesment of coral mining activities in NDR and SDR*, 26 p.
- Mallik T.K. (1999) - Calcareous sands from a coral atoll - Should it be mined or not ? *Marine resources and geotechnology*, vol. 17, pp. 27-32.
- Maniku H. A. (1990) - *Changes in the topography of the Maldives*. Forum of writers on environment (Maldives), Malé, 91 p.

Maragos J.E., Baines G.B.K., Beveridge P.J. (1973) - Tropical cyclone Bebe creates a new land formation on Funafuti atoll. *Science*, vol. 181, pp. 1161-1164.

Marine Research Centre (1999) - *Maldives*. Global coral reef monitoring network. South asia region, 28 p.

Marshall J.F., Jacobson G. (1985) - Holocene growth of a mid-Pacific atoll : Tarawa, Kiribati. *Coral Reefs*, vol. 4, pp. 11-17.

Matteucci R., Russo A. (1985) - Principali facies a coralli nell'atollo di north Malé (Isole Maldive). *Bull. Soc. Geol. It.*, vol. 104, pp. 311-326.

McLean R.F., Hosking P.L. (1991) - Geomorphology of reef islands and atoll motu in Tuvalu. *South Pacific Journal of Natural Science*, vol. 11, pp. 167-189.

McNeil F.S. (1954) - The shape of atolls : an inheritance from subaerial erosion forms. *American Journal Science*, vol. 252, pp. 402-427.

Merlin P. (2001) - *Tourisme et aménagement touristique. Des objectifs inconciliables ?* Les études de la documentation Française, 216 p.

Merrill J., Olsen S., Wimbush M. (1988) - *High waves in the Maldives in 1987 : probable causes and long term implications*. Graduate School of Oceanography - The University of Rhode Island, 9 p.

Ministry of Construction and Public Works (1999a) - *Environmental/technical study for dredging/reclamation works under the Hulhumalé project, Maldives*. Binnie Black and Veatch (SEA) Ministry of construction and public works. Republic of Maldives, Malé.

Ministry of Construction and Public Works (1999b) - *Hulhumalé phase I. Physical development*. Maldives housing and urban development board, 12 p.

Ministry of Economic Affairs, UNEP (1989) - *Republic of Maldives, Implications of sea-level research*. Delft Hydraulics, 44 p.

Ministry of Home Affairs, Housing and Environment (1999) - *Second national environment action plan - NEAP II*. Ministry of Home Affairs, Housing and Environment, 32 p.

Ministry of Planning and Environment (1992) - *The Republic of Maldives - Land study (1969)*, 24 p.

Ministry of Planning and National Development, Republic of Maldives (2002) - *Sixth National Development Plan : 2001-2005*. Malé, 102 p.

Ministry of Tourism (1979) - *Tourism law and regulations*. 72 p.

Ministry of Tourism (1999) - *Maldives Tourism act*. 12 p.

Miossec A. (2000) - Impacts socio-économiques de l'élévation du niveau de la mer : le cas de la France. Actes du Colloque *Le changement climatique et les espaces côtiers. "L'élévation du niveau de la mer : risques et réponses"*, Arles, 12-13 Octobre, p. 40-47.

Miossec A. (2001) - L'évolution de la géographie des océans et des littoraux face aux perspectives du développement durable au XXI^e siècle. Quelles hypothèses envisager? *Annales de Géographie*, vol. 621, pp. 509-526.

Mitchell W., Chittleborough J., Ronai B., Lennon G.W. (2000) - *Sea level rise in Australia and the Pacific*. <http://www.ntf.flinders.edu.au/TEXT/CONF/cook2000/papers/Mitchell2.pdf>, Document Internet, accédé en 2003.

Mitrovica J.X., Milne G.A. (2002) - On the origin of late Holocene sea-level highstands within equatorial oceans basins. *Quaternary Science Reviews*, vol. 21, pp. 2179-2190.

Mitrovica J.X., Peltier W.R. (1991) - On postglacial geoid subsidence over the equatorial oceans. *Journal of Geophysical research*, vol. 96, pp. 20053-20071.

Montaggioni L.F. (1978) - *Recherches géologiques sur les complexes récifaux de l'archipel des Mascareignes (océan Indien occidental)*. Doctorat de Troisième Cycle de Sciences de la Mer et de l'Environnement, Aix-Marseille, 263 p.

Montaggioni L.F. (2000a) - Les récifs coralliens et l'élévation du niveau marin : risques et réponses. Actes du Colloque *Le changement climatique et les espaces côtiers. L'élévation du niveau de la mer : risques et réponses*, Arles, 12-13 Octobre, Paskoff R. (ed.), pp. 28-33.

Montaggioni L.F. (2000b) - Postglacial reef growth. *C.R. Acad.Sci, Sciences de la terre et des planètes*, vol. 331, pp. 319-330.

Montaggioni L.F., Cabioch G., Camoin G.F., Bard E., Ribaud-Laurenti A., Faure G., Dejardin P., Recy J. (1997) - Continuous record of reef growth over the past 14 k.y. on the mid-Pacific island of Tahiti. *Geology*, vol. 25, pp. 555-558.

Montaggioni L.F., Pirazzoli P.-A. (1983) - Utilisation des grès et conglomérats récifaux émergés en tant qu'indicateurs des variations récentes du niveau marin. Actes du colloque *Le Beach-Rock*, Lyon, Maison de l'Orient Méditerranéen (ed.), vol. 8, pp. 91-97.

Moresby (1835) - Extracts from Commander Moresby's report on the Northern atolls of the Maldivas. *Journal Of the Royal Geographical Society of London*, vol. 5, pp. 398-404.

Morgan W.J. (1971) - Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, vol. 230, n° 5288, pp. 42-43.

Morgan W.J. (1972) - Plate motions and deep convection. *Geol. Soc. of Am. Mem.*, vol. 132, pp. 7-22.

Morgan W.J. (1981) - Hotspot tracks and the opening of the Atlantic and Indian oceans. In: Emiliani C. (coord) - *The oceanic lithosphere*, vol. The sea - 7, pp. 443-487.

Mörner N.-A. (1996) - Rapid changes in coastal sea level. *Journal of Coastal Research*, vol. 12, n° 4, pp. 797-800.

Mörner N.-A. (2000) - Sea level changes and coastal dynamics in the Indian ocean. *Integrated coastal zone management*, pp. 17 - 20.

Mörner N.-A. (2004) - Estimating future sea level changes from past records. *Global and Planetary change*, n° 40, pp. 49-54.

Mörner N.-A., Laborel J., Tooley M.J., Dawson S., Allison W. R., Islam S., Laborel F., Collina-Girard J., Rufin C. (2003) - Sea level changes : The Maldives project ũ freed from condemnation to become flooded. Actes du Colloque *European Geophysical Society*, Nice, Geophysical research abstracts (ed.), vol. 5, paper n° 09473.

Mörner N.-A., Tooley M.J. (2001) - *Report from a sampling expedition to the island of Lhosfushi in the South Male Atoll*, 6 p.

Mörner N.-A., Tooley M.J., Possnert G. (2004) - New perspectives for the future of the Maldives. *Global and Planetary change*, n° 40, pp. 177-182.

Munch-Petersen N.F. (1985) - Man and reefs in the Maldives. Continuity and change. Actes du Colloque *Fifth International Coral Reef Congress*, Tahiti, vol. 2.

N.E.S. (2003) - Les îles englouties d'Indonésie. *Courrier International*, 73 p.

Neumeier U., Bernier P., Dalongeville R., Oberlin C. (2000) - Les variations holocènes du niveau marin mises en évidence par les caractères et la diagenèse des beachrocks : exemple de Damnoni (Crète). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 4, pp. 211-220.

- Nagase T., Kunii O., Wakai S., Khaleel A. (2003) - Obstacles to modern contraceptive use among married women in southern urban Maldives. *Contraception*, vol. 68, pp. 125-134.
- Naseer A. (1996) - Status of coral mining in the Maldives : Impacts and management options. *Workshop on integrated reef resources management in the Maldives*, Malé, 16-20 March.
- Naseer A., Hatcher B.G. (2001) - Assessing the integrated growth response of coral reefs to monsoon forcing using morphometric analysis of reefs in Maldives. *Actes du Colloque Proc. Ninth International Coral Reef Symposium*, p. 75-80.
- Naseer A., Hatcher B.G. (2004) - *Inventory of the Maldives coral reefs using morphometrics generated from Landsat ETM+ imagery*. <http://www.springerlink.com/>, Document Internet, accédé en 2004.
- Neumann A.C., Macintyre A. (1985) - Reef response to sea level rise : Keep-up, catch-up or give-up. *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, Tahiti, vol. 3.
- Nunn P.D. (1994) - *Oceanic Islands*. Blackwell, Oxford, 413 p.
- Nunn P.D. (1995) - Holocene sea-level changes in the South and West pacific. *Journal of coastal research*, vol. Special 17, pp. 311-319.
- Nunn P.D. (1998) - Sea-level changes over the past 1,000 years in the Pacific. *Journal of Coastal Research*, vol. 14, pp. 23-30.
- O'Neill C., Müller D., Steinberger B. (2003) - Geodynamic implications of moving Indian Ocean hotspots. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 215, pp. 151-168.
- Paris R. (2004) - *Géodynamique des points chauds*. <http://perso.wanadoo.fr/raphael.paris/>, Document Internet, accédé en 2004.
- Paskoff R. (1993) - *Côtes en danger*. Masson, Pratiques de la géographie, 250 p.
- Paskoff R. (2001) - *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers*. Institut océanographique, Institut océanographique, Collection "Propos", 190 p.
- Pernetta J.C. (1989a) - Cities on oceanic islands: a case study of Male', capital of the Republic of the Maldives. *Proceedings of the first international meeting "cities on water"*. Venice, 11-13 December, pp. 169-182.
- Pernetta J.C. (1989b) - The potential impacts of climatic change and sea level rise on the South Pacific islands. *Small states conference on sea level rise*, Malé, 14-18 November, 15 p.
- Pernetta J.C. (1989c) - Sea-level rise : some implications for Tuvalu. *Ambio*, vol. 18.
- Pernetta J.C. (1992) - Impacts of climate change and sea-level rise on small island states : National and international responses. *Global Environmental Change*, pp. 19-31.
- Pernetta J.C., Elder D.L. (1992) - Climate, sea level rise and the coastal zone : management and planning for global changes. *Ocean and coastal management*, vol. 18, pp. 113-160.
- Pernetta J.C., Sestini G. (1989) - *The Maldives and the impact of expected climatic changes*. UNEP, Regional Seas Reports and Studies n° 104, 84 p.
- Pichon M. (1978) - Recherches sur les peuplements à dominance d'anthozoaires dans les récifs coralliens de Tuléar (Madagascar). *Atoll Research Bulletin*, vol. 222, 447 p.
- Pirazzoli P.A. (1986a) - Marine notches. In: van de Plassche O. (coord) - *Sea-level research : a manual for the collection and evaluation of data*, Geo Books, Amsterdam, pp. 361-400.
- Pirazzoli P.A. (1986b) - Secular trends of Relative Sea-Level (RSL) changes indicated by tide-gauge records. *Journal of coastal research*, vol. Special Issue 1, pp. 1-26.

- Pirazzoli P.A. (1989) - Present and near-future global sea-level changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 75, pp. 241-258.
- Pirazzoli P.A. (1991) - *World atlas of Holocene sea-level changes*. Elsevier, Oceanography series, vol. 58, 300 p.
- Pirazzoli P.A. (1996) - *Sea-Level Changes - The last 20 000 years*. John Wiley & Sons, 211 p.
- Pirazzoli P.A. (1998) - Les conglomérats coralliens : témoins des environnements du passé. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 42, pp. 209-219.
- Pirazzoli P.A., Montaggioni L.F., Delibrias G., Faure G., Salvat B. (1985) - Late Holocene sea-level changes in the Society islands and in the northwest Tuamotu atolls. *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, Tahiti, vol. 3, pp. 539-544.
- Pirazzoli P.A., Montaggioni L.F., Salvat B., Faure G. (1988) - Late Holocene sea level indicators from twelve atolls in the central and eastern Tuamotus (Pacific Ocean). *Coral Reefs*, vol. 7, pp. 57-68.
- Pirazzoli P.A., Montaggioni L.-F., Vergnaud-Grazzini C., Saliege J.F. (1987) - Late holocene sea levels and coral reef development in Vahitahi atoll, eastern Tuamotu islands, Pacific ocean. *Marine Geology*, vol. 76, pp. 105-116.
- Prakash Pandey O., Negi J.G. (1987) - A new theory of the origin and evolution of the Deccan Traps (India). *Tectonophysics*, vol. 142, n° 2-4, pp. 329-335.
- Preu C., Engelbrecht C. (1994) - Background, conceptual structure and organizational-administrative establishing of a "sustainable development strategy" for a coral islands. The exemple of the Maldivian Archipelago (Indian Ocean). *Geojournal*, vol. 33, pp. 433-442.
- Price T. (2003) - High tide in Tuvalu. *Sierra Club Magazine*, vol. July/August, 3 p.
- Purdy E.G. (1974) - Karst-determined facies patterns in British Honduras : Holocene carbonate sedimentation model. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, pp. 53-62.
- Purdy E.G., Bertram G.T. (1992) - *Carbonate Concepts from the Maldives, Indian Ocean*. The American Association of Petroleum Geologists, n° 34, 56 p.
- Purdy E.G., Winterer E.L. (2001) - Origin of atoll lagoons. *Geological Society of American Bulletin*, vol. 113, pp. 837-854.
- Pyrard de Laval F. (1998) - *Voyage de Pyrard de Laval aux Indes Orientales (1601-1611)*. Chandeigne, vol. I, Paris, Cinquième, 511 p.
- R.I.Y.A.N. (2000) - *Environmental impact assessment study for the proposed coastal modifications at K. Rasfaree*. Dhiraagu, 66 p.
- Rajasuriya A., Zahir H., Muley E.V., Subramanian B.R., Venkataraman K., Wafar M.V.M., Munjurul S.M., Khan H., Whittingham E. (2000) - Status of coral reefs in South Asia : Bangladesh, India, Maldives and Sri Lanka. In: Wilkinson C.R. (coord) - *Status of coral reefs of the world : 2000*, GCRMN, pp. 95-115.
- Randrianarimanana P. (2004) - Les Maldives, un paradis tropical et présidentiel. *Courrier International*.
- Reynolds C. (1988) - *Coastal erosion in Tuvalu*. Public works Department, 32 p.
- Richmond B.M. (1992) - Development of Atoll Islets in the Central Pacific. *Proceedings of the Seventh International Coral Reef Symposium*, Guam, vol. 2, pp. 1185-1193.
- Roberts R.G. (1958) - Te atu Tuvalu, A short history of the Ellice islands. *Journal of the polynesian society*, vol. 67, pp. 394-423.

- Rougerie F., Wauthy B. (1986) - Le concept d'endo-upwelling dans la fonctionnement des atolls-oasis. *Oceanologica acta*, vol. 9, n° 2, pp. 133-148.
- Rougerie F., Wauthy B., Andrieu C. (1990) - Validation du modèle d'endo-upwelling géothermique pour un atoll et un récif barrière d'île haute. Actes du Colloque *ISRS*, Nouméa, pp. 197-202.
- Roy P., Connell J. (1989) - The greenhouse effect : Where have all the islands gone ? *Pacific Islands Monthly*, vol. 59, pp. 16-21.
- Roy P., Connell J. (1991) - Climatic change and the future of Atoll States. *Journal of Coastal Research*, vol. 7, pp. 1057-1075.
- Rufin C. (1997) - *Caractéristiques géomorphologiques des atolls de Polynésie Française : le cas de Tetiaroa*. UBO, 220 p.
- Rufin C. (2000) - Shoreline of human-impacted coralline atolls : need for a concerted management. The case-study of Fongafale, atoll of Funafuti, Tuvalu. Actes du Colloque *Coral reefs in the Pacific : status and monitoring, resources and management*, Nouméa, IRD (éd.), vol. II-5, pp. 435-440.
- Rufin C. (2002) - *Evolution des littoraux de l'île de Rihiveli*. EIA, 15 p.
- Salomon J.- N. (2001) - *Précis de Karstologie*. Presses Universitaires de Bordeaux, Collection Scieteren, 256 p.
- Salomon J.- N. (2003) - *Danger pollutions !* Presses Universitaires de Bordeaux, Collection Scieteren, 170 p.
- Salvat B. (1998) - Tourism and coral reef. *UNEP Industry and Environment*, n° 11, pp. 45-48.
- Salvat B. (2000) - Status of Southeast and central Pacific coral reefs in 'Polynesian Mana Node' : Cook islands, French Polynesia, Kiribati, Niue, Tokelau, Tonga, Wallis and Futuna. In: Wilkinson C.R. (coord) - *Status of coral reefs of the world : 2000*, GCRMN, pp. 181-198.
- Samasoni S. (2002) - *Funafuti Lagoon, Tuvalu*. <http://www.reefbase.org>, Document Internet, accédé en 2004.
- Sathiendrakumar R., Tisdell C. (1989) - Tourism and the economic development of the Maldives. *Annals of tourism research*, vol. 16, pp. 254-269.
- Schofield J.C. (1977a) - Effect of late Holocene sea-level fall on atoll development. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, vol. 20, pp. 531-536.
- Schofield J.C. (1977b) - Late Holocene sea level, Gilbert and Ellice islands, west central Pacific ocean. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, vol. 20, pp. 503-529.
- Scott G.A.J., Rotondo G.M. (1983) - A model for the development of types of atolls and volcanic islands on the Pacific lithosphere plate. *Atoll research bulletin*, vol. 260, pp. 1-33.
- Sem G., Campbell J.R., Hay J.E., Mimura N., Ohno E., Yamada K., Serizawa M., Nishioka S. (1996) - *Coastal vulnerability and resilience in Tuvalu. Assessment of climate change. Impacts and adaptation*. SPREP - EAJ - OECC, 130 p.
- Sewell R.B.S. (1932) - The coral coasts of India. *The Geographical Journal*, vol. 79, n° 6, pp. 449-462.
- Shaw G., Williams A.M. (1994) - *Critical issues in Tourism. A geographical perspective*. Blackwell Publishers, The institute of British Geographers, Studies of geography, 280 p.
- Sheth H.C. (1999) - Flood basalts and large igneous provinces from deep mantle plumes : fact, fiction, and fallacy. *Tectonophysics*, vol. 311, pp. 1-29.
- Sheth H.C. (2002) - *The Deccan beyond the plume hypothesis*. <http://www.mantleplumes.org>, Document Internet, accédé en 2003.

- Siddiquie H.N. (1980) - The ages of the storm beaches of the Lakshadweep (Laccadives). *Marine Geology*, vol. 38, pp. 11-20.
- Simon B. (2000) - Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution. Actes du Colloque *Le changement climatique et les espaces côtiers. "L'élévation du niveau de la mer : risques et réponses"*, Arles, p. 6-9.
- Sinaï A. (2004) - Réchauffement climatique, Paradis perdus. *Le Monde* 2, n° Supplément 7, pp. 37-41.
- Sinton J.M., Johnson K.T.M., Price R.C. (1985) - Petrology and geochemistry of volcanic rocks from the northern Melanesian borderland. In: Brocher T.M. (coord) - *Geological investigations of the northern Melanesian Borderland*, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences, vol. 3, Houston, pp. 35-65.
- Sluka R., Miller M.W. (1998) - Coral mining in the Maldives. *Coral Reefs*, vol. 17.
- Smith R. (1995) - *Assessment of lagoon sand and aggregate resources, Funafuti atoll, Tuvalu*. SOPAC, Technical Report n° 212, Suva, 97 p.
- Smithers S.G., Woodroffe C.D. (2000) - Microatolls as sea-level indicators on a mid-ocean atoll. *Marine geology*, vol. 168, pp. 61-78.
- Solomon S.M., Forbes D.L. (1999) - Coastal hazards and associated management issues on South Pacific Islands. *Ocean and Coastal Management*, vol. 42, pp. 523-554.
- Soula C. (2001) - Tuvalu, les îles au cyber-trésor. *Le nouvel observateur*, n° 1909, pp. 18-22.
- South R., Skelton P. (2000) - Status of coral reefs in the southwest Pacific : Fiji, Nauru, New Caledonia, Samoa, Solomon islands, Tuvalu and Vanuatu. In: Wilkinson C.R. (coord) - *Status of coral reefs of the world : 2000*, GCRMN, pp. 159-180.
- Spalding M.D., Grenfell A.M. (1997) - New estimates of global and regional coral reef areas. *Coral Reefs*, vol. 16, pp. 225-230.
- Spalding M.D., Teleki K., Spencer T. (2003) - *Climate change and coral bleaching*. www.unep-wcmc.org/climate/climatebook/spalding.pdf, Document Internet, accédé en 2004.
- Stoddart D.R. (1965) - The shape of atolls. *Marine Geology*, vol. 3, pp. 369-383.
- Stoddart D.R. (1966) - Reef studies at Addu Atoll, Maldives Islands. *Atoll Research Bulletin*, vol. 116, pp. 1-122.
- Stoddart D.R. (1971a) - Environment and history in Indian ocean reef morphology. *Symposia of the Zoological Society of London*, vol. 28, pp. 3-38.
- Stoddart D.R. (1971b) - Rainfall on Indian Ocean coral islands. *Atoll Research Bulletin*, n° 147, pp. 1-21.
- Stoddart D.R. (1973) - Coral reefs : the last two millions years. *Geography*, vol. 58, pp. 313-323.
- Tartinville B. (1994) - *Hydrodynamique des lagons d'atoll, application à l'atoll de Mururoa*. Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaître, Université Catholique de Louvain, 33 p.
- Telavi M. (1983) - *World War II in Tuvalu*. <http://www.tuvaluaislands.com>, Document Internet, accédé en 2003.
- Thompson C.S. (1987) - *The climate and weather of Tuvalu*. New Zealand Meteorological Service, n° 188, Wellington, 40 p.
- Titus J. (1989) - An overview of the effects of sea level rise (with emphasis on the Maldives). *Small states conference on sea level rise*, Malé, 14-18 November.
- Trenhaile A.S. (1987) - *The geomorphology of rocky coasts*. Oxford University Press, Oxford, 384 p.

- Trudgill S. T. (1976) - The marine erosion of limestones on Aldabra atoll, Indian ocean. *Zeitschrift für geomorphologie*, vol. Supplement Band, n° 26, pp. 164-200.
- Tsonis A.A., Hunt A.G., Elsner J.B. (2003) - On the relation between ENSO and global climate change. *Meteorology and Atmospheric physics*, vol. 84, pp. 229-242.
- U.N.D.P. (1988) - *Malé land reclamation and shore protection*. U.N.D.P., 7 p.
- U.N.D.P. (1998) - *Republic of Maldives. Vulnerability and Poverty Assessment*. United Nations Development Programme - Ministry of Planning and National Development, Malé, 247 p.
- U.N.D.P. (1999) - *United Nations Development Programme and Maldives : Three Decades of Cooperation*. UNDP, Male, 34 p.
- U.N.D.P. (2000) - *Social, economic and environmental impacts of tourism. Republic of Maldives*. UNEP- WTO, Madrid, 157 p.
- U.N.D.P. (2001) - *Projects in Maldives - Saving the living World*. <http://www.mv.undp.org/projects/environment.html>, Document Internet, accédé en 2004.
- U.N.D.P., U.N.C.H.S. (1989) - *Republic of Maldives, Garbage collection and disposal Male*. UNDP, Malé.
- Urban F.E., Cole J.E., Overpeck J.T. (2000) - Influence of mean climate change on climate variability from 155-year tropical pacific coral record. *Nature*, vol. 407, 26/10/2000, pp. 989-993.
- Van Andel T., Laborel J. (1964) - Recent high relative sea level stand near Recife, Brazil. *Science*, vol. 145, n° 3632, pp. 580-581.
- Van Dyke J.M. (1991) - Protected Marine Areas and low-lying atolls. *Ocean and shoreline management*, vol. 16, pp. 87-160.
- Van Putten F. (1988) - *The groundwater option. A hydro-geophysical assessment of groundwater resources on the Tuvaluan islands*. UNDP, Technical Report, Suva, 31 p.
- Vannev J-R. (2002) - *Géographie de l'océan Global*. GB, 335 p.
- Vasseur P. (1981) - *Recherches sur les peuplements sciaphiles des récifs coralliens de la région de Tuléar (S.W. de Madagascar)*. Thèse d'Etat de Ecologie marine, Université d'Aix-Marseille II, 348 p.
- Vincent P.M. (1994) - Les trapps. In: BRGM (coord) - *Le volcanisme*, BRGM, Manuels et Méthodes, vol. 25, pp. 221-227.
- Walker H.J. (1984) - *Artificial structures and shorelines*. Baton rouge, 347 p.
- Watanabe T., Gagan M.K., Corrège T., Scott-Gagan H., Cowley J., Hantoro W. (2003) - Oxygen isotope systematics in *Diploastrea heliopora* : New coral archive of tropical paleoclimate. *Geochimica et Cosmochimica acta*, vol. 67, n° 7, pp. 1349-1358.
- Weydert P. (1974) - Morphologie et sédimentologie de la pente externe du Grand Récif de Tuléar (Sud Ouest de Madagascar). *Marine Geology*, vol. 30, pp. 9-19.
- White R., McKenzie D. (1989) - Magmatism at Rift Zones : The generation of volcanic continental margins and flood basalts. *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, n° B6, pp. 7685-7729.
- Wilkinson C.R., Lindén O., Cesar H., Hodgson G., Rubens J., Strong A.E. (1999) - Ecological and socioeconomic impacts of 1998 coral mortality in the Indian Ocean : an ENSO impact and a warming of future change ? *Ambio*, vol. 28, pp. 188-196.
- Wilson T. (1963) - Evidence from islands on the spreading of ocean floors. *Nature*, vol. 197, n° 4867, pp. 536-538.

- Woodroffe C.D. (1989) - *Maldives and Sea-Level Rise : An environmental perspective. Report on a visit to the Republic of Maldives 31 Jan. - 15 Feb. 1989.* University of Wollongong, 62 p.
- Woodroffe C.D. (1992) - Morphology and evolution of reef islands in the Maldives. *Proceedings of the Seventh International Coral Reef Symposium*, Guam, vol. 2, p. 1217-1226.
- Woodroffe C.D., McLean R. (1990) - Microatolls and recent sea level change on coral atolls. *Nature*, vol. 344, pp. 531-534.
- Woodroffe C.D., McLean R.F. (1992) - *Kiribati, Vulnerability to accelerated sea-level rise : a preliminary study.* I.P.C.C., 82 p.
- Woodroffe C.D., McLean R.F. (1994) - Reef islands of the Cocos (Keeling) islands. *Atoll Research Bulletin*, vol. 403, 36 p.
- Woodroffe C.D., McLean R.F., Smithers S.G., Lawson E.M. (1999) - Atoll reef-island formation and response to sea-level change : West Island, Cocos (Keeling) Islands. *Marine geology*, vol. 160, pp. 85-104.
- Woodroffe C.D., McLean R.F., Wallensky E. (1994) - Geomorphology of the Cocos (Keeling) islands. *Atoll Research Bulletin*, vol. 402, 33 p.
- Wyrski K. (1990) - Sea level rise : the facts and the future. *Pacific science*, vol. 44, pp. 1-16.
- Xue C. (2001) - Coastal erosion and management of Majuro Atoll, Marshall Islands. *Journal of coastal research*, vol. 17, pp. 909-918.
- Xue C., Malologa F. (1995) - *Coastal sedimentation and coastal management of Fongafale, Funafuti atoll, Tuvalu.* SOPAC, Technical report n° 221, 54 p.
- Zinke J., Reijmer J.J.G., Thomassin B.A., Dullo W-CH., Grootes P.M., Erlekeuser H. (2003) - Postglacial flooding history of Mayotte Lagoon (Comoro Archipelago, southwest Indian ocean). *Marine Geology*, vol. 194, pp. 181-196.
- Zurick D.N. (1995) - Preserving Paradise. *Geographical Review*, vol. 85, n° 2, pp. 157-172.

LISTE DES FIGURES

Figure 01 : Localisation des archipels étudiés	6
Figure 02 : Présentation simplifiée de l'archipel des Tuvalu	10
Figure 03 : Présentation de l'atoll de Funafuti	11
Figure 04 : Présentation de l'archipel des Maldives	12
Figure 05 : Caractéristiques environnementales de l'archipel des Maldives	20
Figure 06 : Divisions des structures dans les ensembles atolliens par types morphologiques	21
Figure 07 : Bathymétrie simplifiée de la partie Nord Ouest de l'océan Indien	22
Figure 08 : Typologie des îles dans l'archipel des Tuvalu	24
Figure 09 : Présentation des huit autres systèmes récifaux de l'archipel des Tuvalu	25
Figure 10 : Interprétation morphologique de l'île de Vaitupu, archipel des Tuvalu	26
Figure 11 : Typologie de récifs	29
Figure 12 : Localisation et recensement du nombre de farus dans l'archipel des Maldives	30
Figure 13 : La physionomie des structures récifales dans l'archipel des Maldives	32
Figure 14 : Corrélation entre les précipitations annuelles et la profondeur des lagons d'atolls	35
Figure 15 : Convergences morphologiques entre les formes de bioconstruction et les formes de biodestruction	36
Figure 16 : Relation entre le nombre de passes et le nombre de constructions lagonaires	39
Figure 17 : Corrélation entre le nombre de constructions lagonaires et les précipitations annuelles dans l'archipel des Maldives	39
Figure 18 : Distribution morphologique des ensembles au sein d'un récif corallien	43
Figure 19 : Bloc-diagramme schématique d'un atoll pacifique	44
Figure 20 : Exemples de morphologies récifales	47
Figure 21 : Evolution morphologique de la zone à éperons-sillons	48
Figure 23 : La genèse des fractions sédimentaires alimentant les complexes récifaux	60
Figure 24 : Typologie sur l'origine des points chauds	65
Figure 25 : Evolution d'une île née d'un point chaud : théorie darwinienne	68
Figure 26 : Traînée volcanique laissée par le point chaud : des trapps du Deccan à la Réunion	70
Figure 27 : Fonctionnement et approvisionnement magmatique du volcanisme de point chaud	72
Figure 28 : Localisation et âge des alignements volcaniques de type point chaud	76
Figure 29 : Evolution de l'archipel des Maldives du début de l'Eocène (Figure A) au Pléistocène (Figure C)	85

Figure 30 : Reconstitution des courbes d'évolution du niveau marin durant le Miocène dans l'océan Mondial et dans l'archipel des Maldives	87
Figure 31 : Morphologie du géoïde dans les océans Pacifique et Indien	91
Figure 32 : Témoins de paléoniveaux marins	94
Figure 33: Exemples de fissures superficielles et de paléoniveaux marins dans le récif NE de Malé	95
Figure 34 : Exemples de profils sous-marins dans l'atoll de Maalhosmadulu sud	97
Figure 35 : Exemples de profils sous-marins dans l'atoll de Kaafu	98
Figure 39 : Typologie et localisation des morphologies sous-marines, archipel des Maldives	100
Figure 40 : Hypothèses d'évolution pour les mégastructures atolliennes - A	102
Figure 41: Hypothèses d'évolution pour les mégastructures atolliennes – B	103
Figure 42 : Exemples de morphologies karstiques	105
Figure 44: Exemples de profils sous-marins d'après les variations relatives du niveau marin dans l'atoll de Maalhosmadulu sud	107
Figure 45 : Morphologies sous-marines, île d'Hulhudhoo – atoll de Maalhosmadulu s	108
Figure 46 : Structure alvéolaire dans la partie sud-ouest de l'atoll d'Huvadhoo	110
Figure 47 : Mise en évidence de paysages karstiques immergés	111
Figure 48 : Témoin d'un ancien niveau marin sur le platier lagunaire actuel de l'île de Fongafale (Tuvalu)	113
Figure 49 : Phase de démontage d'un microatoll – île de Vilingili, atoll de Malé nord	116
Figure 50 : Interprétation de l'édification et de l'évolution des microatolls d'après les variations relatives du niveau marin	117
Figure 51 : Levé topographique du beach rock de Fulhadhoo dans l'atoll de Goidhoo	119
Figure 52 : Du conglomérat récifal à la plage ancienne : île de Vilingili (atoll de Kaafu)	121
Figure 54 : Témoins d'un haut niveau de sol dans l'île de Vilingili, atoll de Malé nord	122
Figure 55 : Levé de terrain de la mangrove de l'île de Goidhoo et interprétation d'un échantillon prélevé	124
Figure 60 : Essai de reconstruction paléoenvironnementale de l'île d'Hulhudhoo (atoll de Maalhosmadulu sud)	125
Figure 61 : Profil topographique dans l'île d'Hulhudhoo (atoll de Maalhosmadulu sud)	126
Figure 62 : Evolution d'un atoll du Dernier Interglaciaire à l'Holocène	129
Figure 64 : Hypothèses morphologiques durant le dernier maximum glaciaire	130
Figure 65 : Encoches sous-marines à – 18 m	136
Figure 66 : Vers une nouvelle interprétation du niveau de la mer dans l'archipel des Maldives	141
Figure 67 : Relation entre le nombre de récifs et le nombre d'accumulations sédimentaires	149

Figure 68 : Distribution des accumulations sédimentaires	149
Figure 69 : Principales orientations des accumulations sédimentaires dans l'archipel des Maldives	152
Figure 70 : Orientations principales des îles et des récifs dans les atolls maldiviens, d'après photo-interprétation entre 1969 et 1999	153
Figure 71 : Evolution morphologique des îles de la bordure orientale de l'atoll de Funafuti	154
Figure 77 : Présentation de l'île de Rasfari, atoll de Malé nord	158
Figure 79 : Comparaisons de profils littoraux dans l'île de Rasfari entre novembre 2000 – A - et 2001	160
Figure 80 : Comparaisons de profils littoraux dans l'île de Rasfari entre novembre 2000 et 2001 - B	161
Figure 81 : Modèles numériques de terrain de l'île de Rasfari entre novembre 2000 et novembre 2001	162
Figure 82 : L'île de Vilingili, atoll de Kaafu, de 1969 à 1999	164
Figure 83 : Comparaisons de profils dans l'île de Vilingili, atoll de Kaafu, entre mai 2000 et novembre 2000 : exemples de variations saisonnières	165
Figure 84 : Evolution de différents secteurs côtiers lagonaires dans l'île de Fongafale	167
Figure 85 : Inventaire des formes de l'île de Fongafale, atoll de Funafuti	168
Figure 86 : Evolution du littoral lagonaire de l'île de Fongafale (atoll de Funafuti) par photointerprétation entre 1941 et 1995	169
Figure 87 : Le littoral de l'île de Rasfari (Maldives), opposition de façades	171
Figure 88 : Exemples de microformes	173
Figure 89 : Evolution du beach rock par photointerprétation entre 1969 et 1999 dans l'archipel des Maldives	174
Figure 90 : Facteurs influant sur la morphologie des formations sédimentaires	180
Figure 94 : Construction insulaire de type II : exemple de l'île de Fongafale	184
Figure 100 : Comparaison des courbes marégraphiques dans l'archipel des Maldives	193
Figure 101 : Comparaison des données marégraphiques dans l'île de Fongafale, Tuvalu	194
Figure 102 : Variation du niveau marin relatif dans les archipels tuvaluan et maldivien	196
Figure 103 : Comparaison de données marégraphiques dans l'île de Fongafale, Tuvalu	198
Figure 104 : Données marégraphiques latitudinales à l'échelle de l'archipel des Maldives	199
Figure 105 : Distribution des vents, par intensité et direction, dans l'archipel des Tuvalu entre 1982 et 2001	202
Figure 106 : Distribution mensuelle des intensités et des directions de vents dans l'archipel des Tuvalu	203
Figure 110 : Distribution des vents, par intensité et direction, dans l'archipel des Maldives entre 1991 et 2002	205
Figure 111 : Distribution mensuelle des vents et de leur intensité dans l'archipel des Maldives de 1967 à 2002	206

Figure 113 : Localisation des îles tuvaluanes ayant été touchées par les principaux cyclones au XXe siècle	210
Figure 115 : Recensement des îles maldiviennes touchées par des événements tempétueux	213
Figure 117 : Localisation et occurrence des îles inondées dans l'archipel des Maldives	214
Figure 119 : Variabilité climatique dans l'île de Fongafale, archipel des Tuvalu	216
Figure 123 : Distribution mensuelle des précipitations dans l'atoll de Funafuti de 1971 à 1992	217
Figure 125 : Variabilité climatique entre les stations de Gan et d'hulhulé entre 1967 et 2002	218
Figure 127 : Distribution des moyennes annuelles de températures dans l'archipel central des Maldives	219
Figure 129 : Distribution mensuelle des moyennes de températures (maximales et minimales) dans l'archipel des Maldives	221
Figure 130 : Distribution des températures mensuelles, minimales et maximales, dans l'archipel des Tuvalu suivant des moyennes décennales de 1960 à 1981	223
Figure 135 : Nombre de provinces récifales affectées par les phases de blanchiment entre 1979 et 1998	229
Figure 136 : Blanchiment en cours dans la passe SW de l'atoll de Goidhoo (-20m)	229
Figure 138 : Uniformité dans les éléments coralliens d'une pente externe aux Maldives	235
Figure 139 : Comparaison des courbes de température des eaux lagunaires dans l'atoll de Funafuti	237
Figure 140 : Comportement de l'appareil récifal durant la remontée postglaciaire du niveau de la mer	242
Figure 142 : Comportement insulaire en cas d'élévation de + 1 m en conditions météorologiques normales	246
Figure 143 : Comportement insulaire en cas d'élévation de + 1 m en conditions tempétueuses	247
Figure 144 : Evolution de la population totale dans l'archipel des Tuvalu	257
Figure 147 : Evolution de la population totale dans l'archipel des Maldives	257
Figure 148 : Densité de population dans les îles de l'archipel des Maldives	259
Figure 152 : Répartition de la population maldivienne en 2001 dans les différentes provinces administratives	261
Figure 153 : Exemples de parcelles cadastrales dans la partie septentrionale de l'île de Fongafale	264
Figure 155 : Exemples de la fonctionnalité insulaire dans l'atoll de Kaafu, Maldives	271
Figure 156 : Politiques d'aménagements de l'espace : quelques exemples	273
Figure 157 : Nouvelle politique transmigrationnaire dans l'archipel des Maldives	275
Figure 162 : Les migrations historiques de populations dans l'archipel des Maldives	276
Figure 165 : Les nouvelles politiques de développement insulaire dans l'archipel septentrional	278
Figure 167 : Evolution du nombre de touristes dans l'archipel des Maldives de 1972 à 2003	281
Figure 168 : Flux touristiques aux Maldives en 2003	281

Figure 174 : Evolution diachronique des structures hôtelières dans l'archipel des Maldives en 2001	283
Figure 175 : Distribution radiale des principales structures hôtelières dans l'archipel des Maldives par rapport à l'aéroport d'Hulhulé	284
Figure 178 : Evolution du nombre de touristes dans l'archipel des Tuvalu	291
Figure 179 : Origine des touristes durant l'année 2000 à titre d'exemple (archipel des Tuvalu)	291
Figure 180 : Inventaire des ouvrages côtiers dans les structures hôtelières : le cas des brise-lames	295
Figure 186 : Evolution artificielle de l'île de Malé entre 1960 et 1999	301
Figure 187 : Vulnérabilité des matériaux de construction	304
Figure 189 : Exemple d'un remblaiement entre les îles de Dhiyamigili et Thinkolhufushi, atoll de Kolhumadulu (Maldives)	306
Figure 190 : Différentes pratiques de remblais	308
Figure 192 : Exemples de protections côtières sur les littoraux des îles basses	312
Figure 194 : Modèle numérique de terrain dans l'île de Tengako : exemple d'une île excavée	315
Figure 195 : Le remplissage d'un borrow pit avant et pendant la marée montante, île de Fongafale (Tuvalu)	317
Figure 196 : Proportion du nombre de maisons construites avec des éléments coralliens dans les îles locales de l'archipel maldivien	322
Figure 197 : Zones recommandées pour l'extraction des matériaux coralliens dans les atolls centraux de l'archipel des Maldives	324
Figure 199 : Différents prélèvements et usages de matériaux coralliens	326
Figure 202 : Recensement des événements naturels et anthropiques ayant affecté l'archipel des Maldives	342
Figure 204 : Production de déchets dans l'île de Fongafale en 2001, atoll de Funafuti	347
Figure 205 : Schéma organisationnel des déchets sur l'île de Fongafale, atoll de Funafuti	350
Figure 206 : Limite approximative de la zone marine protégée dans l'atoll de Funafuti	360
Figure 207 : Localisation des zones marines protégées dans l'archipel des Maldives	364
Figure 208 : Pénétration de l'eau de mer par marée montante dans le borrow pit de l'île de Tengako, atoll de Funafuti	373

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques morphologiques des structures récifales dans l'archipel des Maldives	27
Tableau 2 : Exemple de vitesse d'érosion	99
Tableau 3 : Relations entre les changements eustatiques et la vitesse de rotation de la Terre	137
Tableau 4 : Evolution du nombres d'îles das l'archipel des Madives référencées dans les ouvages	147
Tableau 5 : Recensement des îles identifiées par photographies aériennes	150
Tableau 6 : Interprétation eustatique dans l'océan Pacifique	189
Tableau 7 : Exemples de quelques événements cycloniques dans l'archipel des Tuvalu	208
Tableau 8 : Récurrence du phénomène pour la décennie 1990	225
Tableau 9 : Physionomie des pentes récifales durant les campagnes INQUA de 2000 et 2001	230
Tableau 10 : Exemples de couverture corallienne avant et après l'événement de 1998	232
Tableau 11 : Exemples de modifications climato-océaniques d'ici à 2100	239
Tableau 12 : Densité de population en 1985	260
Tableau 13 : Importance du morcellement parcellaire dans les îles basses de l'archipel tuvaluan	265
Tableau 14 : Recensement étatique des érosions insulaires dans les atolls administratifs maldiviens (en %)	298
Tableau 15 : Evolution de la production des déchets (industriels et domestiques) transportés sur l'île de Thilafushi, de 1999 à 2003 (Japan International Cooperation Agency, 1999)	310
Tableau 16 : Evolution des extractions de blocs coralliens (en m ³)	325
Tableau 17 : Estimation des besoins en blocs coralliens (en m ³)	327
Tableau 18 : Evolution des extractions de sables coralliens (en m ³)	328
Tableau 19 : Estimation des besoins en sables coralliens (en m ³)	328
Tableau 20 : Evolution des extractions de fragments coralliens (en m ³)	329
Tableau 21 : Estimation des besoins en fragments coralliens (en m ³)	329
Tableau 22 : Recensement du nombre de dhonis lié au secteur de l'extraction sédimentaire	330
Tableau 23 : Prix pratiqués par différentes îles de l'archipel pour le prélèvement corallien	331
Tableau 24 : Nombre de mineurs professionnels entre 1985 et 1990	332
Tableau 25 : Acteurs des extractions coralliennes pratiquées dans l'archipel, d'après des exemples pris depuis le nord jusqu'au sud des Maldives	332
Tableau 26 : Suivi des extractions dans l'île de Baarah, atoll de Haa Alif	335

PREMIERE PARTIE

LES ATOLLS DANS LEUR CONTEXTE

STRUCTURAL ET OCÉANIQUE

Introduction de la premiere partie	17
---	-----------

CHAPITRE 1 – VARIATIONS MORPHOLOGIQUES DES ARCHIPELS : FORMES ET ASSOCIATIONS DE FORMES

1.1. Originalités des formes atolliennes	19
1.1.1. Inventaire des structures récifales	19
1.1.2. Formes structurales et/ou environnementales : le cas particulier des lagons d'atolls	34
1.2. Eléments physiographiques récifaux	41
1.2.1. L'ensemble frontorécifal	42
1.2.1.1. La dalle corallienne	45
1.2.1.2. La zone des éperons-sillons	45
1.2.2. L'ensemble épirécifal	46
1.2.2.1. Le platier externe	49
1.2.2.2. Les levées détritiques	50
1.2.2.3. Le platier interne	51
1.2.2.4. Les dépôts sédimentaires	52
1.2.2.5. La pente interne	53
1.2.3. L'ensemble postrécifal	53
1.2.3.1. Les pinacles et les patates coralliennes	54
1.2.4. Les discontinuités morphologiques	55
1.3. Les facteurs écologiques des récifs coralliens	57
1.3.1. Les facteurs abiotiques et édaphiques	57
1.3.2. Les facteurs de la « biogénèse »	58
1.3.2.1. Les organismes bioconstructeurs	59
1.3.2.2. Les organismes biodestructeurs	61

CHAPITRE 2 – LA GENESE DES ATOLLS

2.1. Le volcanisme intraplaque	63
2.1.1. Définition et origine des points chauds	63
2.1.2. Les alignements insulaires	66
2.2. Quels sont les origines des archipels étudiés ?	67
2.2.1. L'alignement des Maldives	69
2.2.2. L'alignement des Tuvalu	74
2.3. Pourquoi de tels alignements ?	77
2.3.1. Les fondements de la morphogénèse insulaire	78
2.3.2. La vitesse de subsidence des archipels	79
2.3.3. Les autres théories	81
2.4. L'évolution morphologique d'une plate-forme carbonatée : l'exemple des Maldives	83
2.4.1. Au Paléogène	84
2.4.2. Au Néogène	86

CHAPITRE 3 – LE ROLE DES VARIATIONS EUSTATIQUES DANS L'ÉVOLUTION DES ARCHIPELS

3.1. Généralités sur les variations du niveau de la mer	89
3.2. Evidences de morphologies nées de paléo-niveaux marins	90
3.2.1. Les témoins érosifs	92
3.2.1.1. Les encoches littorales : des formes régressives ?	92
3.2.1.2. Les formes karstiques	101
3.2.1.3. Les <i>Breccia</i>	112
3.2.2. Les formes construites	114
3.2.2.1. Les micro atolls	114
3.2.2.2. Du conglomérat à la plage ancienne	118
3.2.2.3. Les mangroves	120
3.2.2.4. Les sols	123
3.3. Quelles sont les origines de ces formes ?	123
3.3.1. Le Dernier Interglaciaire	127
3.3.2. Le Dernier Maximum Glaciaire	128
3.3.3. La Remontée postglaciaire	131
3.3.4. L'Optimum climatique	135
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	142

DEUXIEME PARTIE

LES FACTEURS D'EVOLUTION INFLUENCANT LES STRUCTURES ATOLLIENNES

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE	144
---	------------

CHAPITRE 4 – EVOLUTION DES ACCUMULATIONS SEDIMENTAIRES A DIFFERENTES ECHELLES DE TEMPS ET D'ESPACES

4.1. Inventaire spatial des structures insulaires	145
4.2. Evolution multiscalaire des îles	155
4.2.1. Le suivi topographique de l'île de Rasfari	156
4.2.2. Le suivi topographique de l'île de Vilingili	163
4.2.3. L'évolution morphologique de l'île de Fongafale	166
4.3. Le beach rock : archive de l'évolution	170
4.4. L'origine des accumulations sédimentaires	176
4.4.1. Une construction eustatique	176
4.4.3. Une construction météo-océanique	177
4.4.2. Une construction paroxysmale	181
4.4.4. Histoires des îles : typologie insulaire	183

CHAPITRE 5 – LES AGENTS CONTEMPORAINS DE LA DYNAMIQUE LITTORALE

5.1. Variations eustatiques	188
5.1.1. Les données concernant les Tuvalu	189
5.1.2. Les données concernant les Maldives	190
5.2. Les enseignements issus des variations du niveau moyen de la mer	192
5.3. Evolution des conditions climatiques sur la période historique récente	200
5.3.1. Les paramètres anémométriques	201
5.3.1.1. Les caractéristiques des vents aux Tuvalu	201
5.3.1.2. Les caractéristiques des vents aux Maldives	204
5.3.1.3. Les cyclones et les îles	208
5.3.2. Les conditions pluviométriques	215
5.3.3. Les conditions de température	220
5.4. Le phénomène El Niño et son influence sur les conditions climatiques	222
5.4.1. Son fonctionnement	224
5.4.2. Les incertitudes concernant l'impact climatique d'El Niño	226
5.5. Le blanchiment des coraux : un phénomène associé ?	228

CHAPITRE 6 – LES COMPORTEMENTS ENVIRONNEMENTAUX DANS LA PERSPECTIVE DES CHANGEMENTS GLOBAUX

6.1. Les scénarii envisagés	238
6.1.1. Les prévisions climatiques	238
6.1.2. Les prévisions eustatiques	239
6.2. Atolls : les enseignements tirés du passé	240

6.2.1. La réponse des récifs	241
6.2.2. La réponse des colonies coralliennes	243
6.2.3. Le comportement insulaire	245
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	248

TROISIEME PARTIE

L'HOMME ET LA GESTION DU MILIEU

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE	250
CHAPITRE 7 – LES MILIEUX INSULAIRES FACE AUX NOUVELLES CONTRAINTES SOCIO-ECONOMIQUES	
7.1. PARTICULARITES DES MICRO-ETATS INSULAIRES	252
7.1.1. Notion de surpopulation	256
7.2. LES FONDEMENTS DE L'OCCUPATION DU SOL	263
7.2.1. L'organisation du parcellaire, un morcellement foncier	263
7.2.2. La structure foncière	266
7.2.2.1. cas pratique : la monofonctionnalité insulaire : spécificité maldivienne	270
7.2.3. Vers une nouvelle gestion des territoires insulaires	272
7.2.3.1. La nouvelle organisation étatique du territoire tuvaluan	272
7.2.3.2. Mise en place d'une politique transmigrationnaire dans l'archipel maldivien	272
7.3. Le développement touristique des îles basses	280
7.3.1. L'évolution diachronique du tourisme dans l'archipel maldivien	280
7.3.2. Une activité planifiée ...	285
7.3.3. ... et symboliquement réglementée	286
7.3.4. Les Tuvalu : un archipel aux capacités touristiques limitées	289
7.3.5. La pression touristique : un danger pour les Maldives	290
7.3.5.1. Diversification de l'offre touristique	292
7.3.5.2. Le poids de l'activité touristique sur l'environnement insulaire	294
CHAPITRE 8 – LES PRESSIONS ANTHROPIQUES EXERCEES SUR LES MILIEUX INSULAIRES : LE CAS DES ARTIFICIALISATIONS	
8.1. Une politique d'aménagement côtier	300
8.1.1. Les raisons de la création des îles artificielles	300
8.2. Des littoraux sur-artificialisés	310
8.2.1. Les perturbations nées de l'histoire	314
8.2.2. Les extractions : la pratique du mining	320
8.3.3. Les différents matériaux issus de l'extraction	323
8.3.3.1. L'extraction de blocs coralliens	323
8.3.3.2. L'extraction sableuse	327
8.3.3.3. L'extraction des fragments coralliens : les akiri	329
8.2.4. Pratique interdites ou tolérées ?	331
8.3. Les conséquences des extractions sur l'évolution du milieu	337
CHAPITRE 9 – VERS UNE GESTION PLUS ADAPTEE DES ESPACES LITTORAUX INSULAIRES	
9.1. Réflexion sur le thème de l'assainissement	341
9.2. Repenser la gestion des déchets	345
9.2.1. Analyse de la production et du système en place	345
9.2.1.1. La production	345

9.2.1.2. Le système de gestion des déchets	346
9.2.1.3. Limites du système et propositions	348
9.2.1.4. Des propositions pour une meilleure gestion des problèmes	349
9.3. Quelques réflexions sur les extractions de matériaux coralliens	352
9.4. Du tourisme de masse au tourisme adapté	356
9.5. Les initiatives environnementales	358
9.5.1. Les zones marines protégées	358
9.5.1.1. Aux Tuvalu	358
9.5.1.2. Aux Maldives	362
9.6. Limiter la dépendance économique	365
 CHAPITRE 10 – DES CHANGEMENTS EUSTATIQUES A TOUT PRIX !	
 10.1. Les impacts économiques des changements climatiques	368
10.2. Les changements climatiques ou eustatiques responsables de tous les maux des îles	370
10.3. Vers la reconnaissance des réfugiés environnementaux ?	375
 CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE	378
 CONCLUSION GENERALE	379
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	383
LISTE DES FIGURES	401
LISTE DES TABLEAUX	406
TABLE DES MATIERES	407
 ANNEXES – Volume séparé	